



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

Análisis de la fragmentación del desprendimiento d'Abella de la Conca, Pallars Juss

Trabajo realizado por:

Ander Del Valle Alfonso

Dirigido por:

Jordi Corominas Dulcet

Roger Ruiz Carulla

Máster en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, 9 de Junio de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MASTER

Resumen

El presente trabajo de final de Máster analiza el fenómeno de la fragmentación en desprendimientos rocosos. La complejidad que presenta este tipo de eventos dificulta la obtención de modelos y herramientas que permitan simular la fragmentación y propagación de los desprendimientos de roca. La fragmentación del macizo rocoso provocada por el impacto de bloques de roca desprendidos con el terreno se analiza al comparar la distribución de volúmenes de bloques iniciales (IBSD) que se desprenden en la pared rocosa y la distribución de volúmenes de bloque que caracterizan el depósito (RBSD).

En la presente tesina, se estudia un caso real ocurrido en d'Abella de la Conca (Pallars Juss), en la localidad de Isona (Lleida). Analizando la distribución obtenida, se observa que el tamaño de los fragmentos más pequeños aumenta considerablemente en el depósito, concluyendo que las distribuciones de bloques de roca fragmentados siguen una ley potencial.

La metodología adoptada en este estudio es la utilización de UAV (dron con control remoto) con fotogrametría digital ha sido la elegida para obtener la ortofoto y el modelo 3D de la zona de estudio. Gracias a esto, se permite caracterizar el patrón de discontinuidades y juntas presentes en el macizo rocoso para la estimación de la IBSD. Además, permite la medida de la distribución de volúmenes de fragmentos de roca presentes en el depósito (RBSD).

Se utiliza un modelo de fragmentación fractal propuesto por Ruiz-Carulla et al (2017) basado en los conceptos propuestos por Perfect (1997), pero aplicado a desprendimientos rocosos. Este modelo trata de simular el proceso de fragmentación ocurrido durante el desprendimiento. Se comparan los resultados obtenidos mediante fotogrametría digital con los simulados en el modelo para comprobar la validez del mismo.

El objetivo final del presente proyecto es la comparación de resultados del desprendimiento analizado en este estudio con los demás casos inventariados dentro del marco de proyectos de RockModels (anteriormente RockRisk). Por lo tanto, este estudio servirá para ampliar dicho inventario de casos reales y ampliar también el conocimiento de la fragmentación en desprendimientos rocosos.

Abstract

The present Master's final work analyzes the phenomenon of fragmentation in rockfalls. The complexity of this type of events makes it difficult to obtain models and tools that simulate the fragmentation and propagation of rockfalls. The fragmentation of the rock mass caused by the impact of blocks with the ground is analyzed by comparing the distribution of initial block volumes (IBSD) that break from the rock wall and the distribution of block volumes that characterize the deposit (RBSD).

In this thesis, a real case is studied, occurred in d'Abella de la Conca (Pallars Juss), in the town of Isona (Lleida). Analyzing the distribution obtained, it is observed that the size of the smallest fragments increases considerably in the deposit, concluding that the distributions of fragmented rock blocks follow a potential law behaviour.

The methodology adopted in this study is the use of UAV (drone with remote control) with digital photogrammetry, obtaining the orthophoto and 3D model of the study area. Thanks to this, it is possible to characterize the pattern of discontinuities and joints in the rock mass for the estimation of the IBSD. In addition, it is possible the measurement of the volume distribution of rock fragments in the deposit (RBSD).

A fractal fragmentation model proposed by Ruiz-Carulla et al (2017) is used based on the concepts proposed by Perfect (1997), but applied to rockfalls. This model aims at simulating the fragmentation process that occur during the event. The results obtained by digital photogrammetry are compared with those simulated in the model to validate them.

The final objective of this project is to compare the results of the rockfall analyzed in this study with the other cases inventoried within the framework of RockModels projects (formerly RockRisk). Therefore, this study will serve to expand this inventory of real cases and also expand the knowledge of fragmentation in rockfalls.

ÍNDICE

1. Introducción.....	7
2. Estado del arte	11
2.1 Desprendimientos rocosos	11
2.2 Fragmentación en desprendimientos rocosos.....	14
2.3 Metodologías para la caracterización del desprendimiento (IBSD, RBSD)	19
3. Objetivos	26
4. Desprendimiento de Isona (Abella de la Conca).....	28
5. Análisis de fragmentación	36
5.1 Metodología adoptada	36
5.2 Reconstrucción del volumen de salida y caracterización de la IBSD	40
5.3 Caracterización de la RBSD	45
5.3.1 Cartografía manual	45
5.3.2 Correcciones cartografía manual sobre modelo 3D	57
5.4 Modelo de fragmentación RFFM	58
5.4.1 RFFM por clases en software Excel	62
5.4.2 RFFM en software Matlab	66
5.4.3 RFFM variante a la escala en software Matlab	68
6. Comparativa con casos estudiados en RockModels	72
7. Conclusiones	79
8. Líneas de investigación futuras	81
Propuesta de mejoras en la metodología adoptada en esta tesina.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema del RockFall Fractal Fragmentation Model (RFFM) a utilizar en el caso de Isona.....	9
Figura 2.1 Ilustración gráfica de los desprendimientos rocosos y parámetros relacionados. (Jaboyedoff et al, 2001).....	11
Figura 2.2 Definición de los parámetros morfológicos de un desprendimiento rocoso. (E.T. Bowman et al., 2014).....	12
Figura 2.3. Ortofoto del desprendimiento de Cadí massif (al este de los Pirineos) en 2011, se distinguen diferentes zonas homogéneas en el debris cover y despósito. (Ruiz-Carulla et al., 2015)	15
Figura 2.4. Ilustración de modelos fractales de fragmentación. Permite demostrar que fragmentación es invariante a la escala. (D.L. Turcotte, 1986)	16
Figura 2.5. Impactos únicos o múltiples en un bloque de roca y diferentes ejemplos de direcciones de impacto en relación a los planos de debilidad. (Ruiz-Carulla, 2016).....	18
Figura 2.6. Ilustración de la persistencia de juntas en un macizo rocoso. (B.H. Kim et al., 2007).....	20
Figura 2.7. Ilustración gráfica de zonas de sombra en el uso de técnicas de escaneo láser. (M. Sturzenegger et al. 2009)	22
Figura 2.8. Secuencia extraída del video “Major Rock Fall Occurs Next to a Climber in Chulilla, Spain, en la plataforma Youtube. Se muestra una disgregación de la masa de roca, que caracterizará la IBSD.	24
Figura 2.9. Efectos de la disgregación y de la rotura en desprendimientos rocosos. (R. Ruiz et al., 2017).	25
Figura 3.1. Gráfica cedida por Ruiz-Carulla. Distribuciones de volúmenes de bloques de roca medidos en los desprendimientos Pont de Gulleri, Lluçà etc en el marco del Proyecto RockModels.	28
Figura 4.1. Localización del desprendimiento rocoso a estudiar en Isona, Lleida. (Instituto Cartográfico de Cataluña)	29
Figura 4.2. Mapa geológico de la zona de estudio. (Instituto cartográfico de Cataluña)	29
Figura 4.3. Mapa topográfico de la zona de estudio. (Instituto Cartográfico de Cataluña)	30
Figura 4.4. Fotografía aérea de la zona del desprendimiento, cedida por Roger Ruiz.	31
Figura 4.5. Fotografía aérea editada resaltando las zonas de estudio (cicatriz, depósito y bloques aislados).....	32
Figura 4.6. Fotografía cedida por Roger Ruiz Carulla. Fotografía aérea con dron de la cicatriz del desprendimiento.	33
Figura 4.7. Fotografía cedida por Roger Ruiz Carulla. Fotografía aérea con dron del depósito bajo la pared rocosa.....	33
Figura 4.8. Ortofoto a escala 1:2000 de la zona de estudio previa al desprendimiento, año 2005. (Google Earth Pro)	34
Figura 4.9. Ortofoto a escala 1:2000 de la zona de estudio posterior al desprendimiento, año 2017. (Instituto Cartográfico de Cataluña).....	35
Figura 5.1. Imagen del dron DJI Inspire 1 Pro utilizado para la obtención de datos en campo.	36
Figura 5.2. Ortofoto de la zona de estudio (Instituto Cartográfico de Cataluña). Resolución de 25cm.	37
Figura 5.3. Ortofoto de la zona de estudio (cedida por Ruiz-Carulla). Resolución 2cm.	38
Figura 5.4. Modelo 3D (nube de puntos) de la zona de estudio. Visualización mediante software CloudCompare.....	39
Figura 5.5. Reconstrucción del volumen desprendido sobre fotografía aérea.	41
Figura 5.6. Cortado y remodelado del volumen reconstruido del desprendimiento mediante el software Rhinoceros.	42
Figura 5.7. Cortes realizados sobre el volumen reconstruido del desprendimiento (Software Rhinoceros).	43
Figura 5.8. Remodelado y reconstrucción final del volumen del desprendimiento para la caracterización del IBSD (software Rhinoceros.	44
Figura 5.9. Gráfica de la distribución de volúmenes de bloques iniciales (IBSD)	45
Figura 5.10. Ortofoto editada de la zona de estudio en el año 2005, previa al desprendimiento (Google Earth Pro).	46

Figura 5.11. Ortofoto editada de la zona de estudio con los bloques de roca fragmentados en el desprendimiento.	47
Figura 5.12. Imagen en detalle del depósito del desprendimiento, resolución de 2cm. (Imagen cedida por Roger Ruiz-Carulla)	48
Figura 5.13. Imagen en detalle editada de las rocas a medir en el depósito cercano al desprendimiento.	51
Figura 5.14. Gráfico de la distribución de áreas de los fragmentos de bloques de roca en el desprendimiento de Isona.....	52
Figura 5.15. Rocas medidas en el depósito. Ortofoto de 25cm de resolución ofrecida por el Instituto Cartográfico de Calatunya.	53
Figura 5.16. Gráfico de la distribución de áreas de los fragmentos de bloques de roca en el desprendimiento de Isona medidas en ortofoto ofrecida por el Instituto Cartográfico de Cataluña.....	54
Figura 5.17. Esfera inscrita a un cubo, figura utilizada para estimar el volumen de los fragmentos de roca.	54
Figura 5.18. Estimación mediante el software Cloud Compare del volumen de los dos bloques más grandes en la nube de puntos.	57
Figura 5.19. Probabilidad de fallo ($P(1/b^i)$) y factor de escala (b) en el proceso de fragmentación. (R. Ruiz 2016).....	60
Figura 5.20. Proceso de fragmentación con un ratio de supervivencia ($S_r=0,33$) y un factor de escala ($b=2$). (R. Ruiz 2016).	61
Figura 5.21. Gráfica de la distribución de volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo RFFM de ROCKRISK. ($P= 0,12$, $b= 4,65$, $S_r= 0,67$).....	64
Figura 5.22. Gráfica de la frecuencia relativa acumulada de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo RFFM de ROCKRISK. ($P= 0,12$, $b= 4,65$, $S_r= 0,67$)	65
Figura 5.23. Gráfica de la frecuencia relativa acumulada de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo RFFM de ROCKRISK. ($P= 0,4$, $b= 3,5$, $S_r= 0,55$)	66
Figura 5.24. Gráfica de frecuencia relativa de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo en Matlab. ($P= 0,31$, $b= 3,4$, $S_r= 0,73$).....	68
Figura 5.25. Gráfica de la distribución de volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo variante a la escala en Matlab. ($r= 0,00001$, $b= 1,823$, $S_r= 0,681$)	70
Figura 5.26. Gráfica de frecuencia relativa de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo en Matlab variante a la escala. ($r= 0,00001$, $b= 1,823$, $S_r= 0,681$)	71
Figura 6.1. Distribuciones de volúmenes de bloques de roca medidos en los desprendimientos Pont de Gulleri, Lluçà etc en el marco del Proyecto RockModels, incluyendo el caso de Isona.	73
Figura 6.2. Gráfico de la superficie de la cicatriz en función del volumen total de desprendimiento de los casos de RockModels, incluido Isona.	74
Figura 6.3. Gráfica del número total de bloques e IBSD, RBSD y RFFM en función del volumen total del desprendimiento para los casos de RockModels, incluido Isona.	75
Figura 6.4. Gráfica de los parámetros de los modelos (b y S_r) en función de la dimensión fractal de los casos de RockModels, incluido Isona.	76
Figura 6.5. Gráfica de la superficie nueva generada en función del volumen total del desprendimiento de los casos de RockModels, incluido Isona.....	77
Figura 6.6. Gráfica de los valores de los parámetros del modelo en funciones de la superficie nueva generada (adimensionalizada) de los casos de RockModels, incluido Isona.	78
Figura 8.1. Análisis de trayectorias en desprendimientos rocosos.	81

1. Introducción

La presente tesina se centra en el estudio del proceso de fragmentación en desprendimientos ocurridos en taludes o paredes rocosas. Los fenómenos de desprendimientos rocosos son eventos frecuentes en áreas de montaña, los cuales derivan en un impacto socioeconómico considerable, que aumenta con una mayor frecuencia y exposición a este tipo de procesos.

La fragmentación es uno de los mecanismos que aparecen en los desprendimientos rocosos. Un desprendimiento fragmentario se caracteriza por la separación de masa rocosa en bloques de menor tamaño en consecuencia de impactos con la superficie topográfica (Evans y Hungr, 1993). Los desprendimientos rocosos se distinguen de las avalanchas de rocas en que los sólidos se comportan de manera individual, mientras que en las avalanchas tienen comportamiento de flujo. Ambos son eventos extremadamente rápidos y que abarcan grandes superficies.

Generalmente, la fragmentación y la energía disminuyen tras el primer impacto con la superficie topográfica (Giani et al., 2004). Son procesos muy difíciles de modelar ya que intervienen muchos parámetros, como pueden ser la persistencia de juntas y discontinuidades, energías de impacto, rigideces tanto de la masa rocosa como de la superficie del terreno... (Chau et al., 2002). Por lo tanto, la fragmentación es un mecanismo complejo, en el cual, tendiendo como objetivo el análisis del proceso y su simulación, es de vital importancia la estimación del volumen inicial del desprendimiento de roca, para facilitar la estimación de energías de impacto y trayectorias de bloques de roca (Jaboyedoff et al., 2005).

El presente proyecto, en este sentido, se centra en la investigación del proceso de fragmentación en desprendimientos rocosos, con el objetivo de calibrar un modelo de fragmentación que se ajuste a un caso real dado en la localidad de Isona. Por lo tanto, se desarrollará en un estudio para la comprensión y análisis de la fragmentación y la distribución de volúmenes de bloques de roca presentes en el depósito del desprendimiento. La presente tesina tendrá en cuenta la influencia de las

discontinuidades presentes en un macizo rocoso en su fragmentación tras impactar con el terreno, como también a lo largo de su trayectoria.

Como ya se ha mencionado, se estudiará un caso concreto para el análisis del proceso de fragmentación, más concretamente un desprendimiento de roca ocurrido en la localidad Isona, Lérida, en el año 2006. Se reconstruye el volumen desprendido. Para ello, se utiliza vuelos de dron para capturar imágenes que permitan la obtención de un modelo 3D mediante técnicas de fotogrametría digital. A partir del modelo 3D de la cicatriz, se reconstruye el volumen desprendido y se caracteriza el patrón de discontinuidades. Gracias a esto, se corta dicho volumen para obtener una distribución de volúmenes de bloques inicial (*In Situ Block Size Distribution*, IBSD) que caracterizará el estado inicial de la masa rocosa.

A partir del vuelo de dron se obtiene también una ortofoto de 2 centímetros de resolución que permite una cartografía detallada de 3.988 bloques en el depósito. A partir de las medidas de áreas en los fragmentos cartografiados, se obtiene la distribución de volúmenes de bloque en el depósito (*Rockfall Block Size Distribution*, RBSD).

Para el análisis de fragmentación, se utiliza un modelo propuesto por Ruiz-Carulla et al (2017) de 3 parámetros (ratio de supervivencia, probabilidad de fallo y un factor de escala) que permite simular el proceso de fragmentación dado en el desprendimiento, desde el momento de la rotura hasta el depósito formado.

La figura 1.1 presenta un esquema de la metodología a seguir durante este estudio. Se trata de una ilustración de cómo se ofrecen los resultados de distribuciones de bloques (IBSD y RBSD) desde los datos obtenidos en campo, y cómo después el modelo trata de ajustar estos resultados.

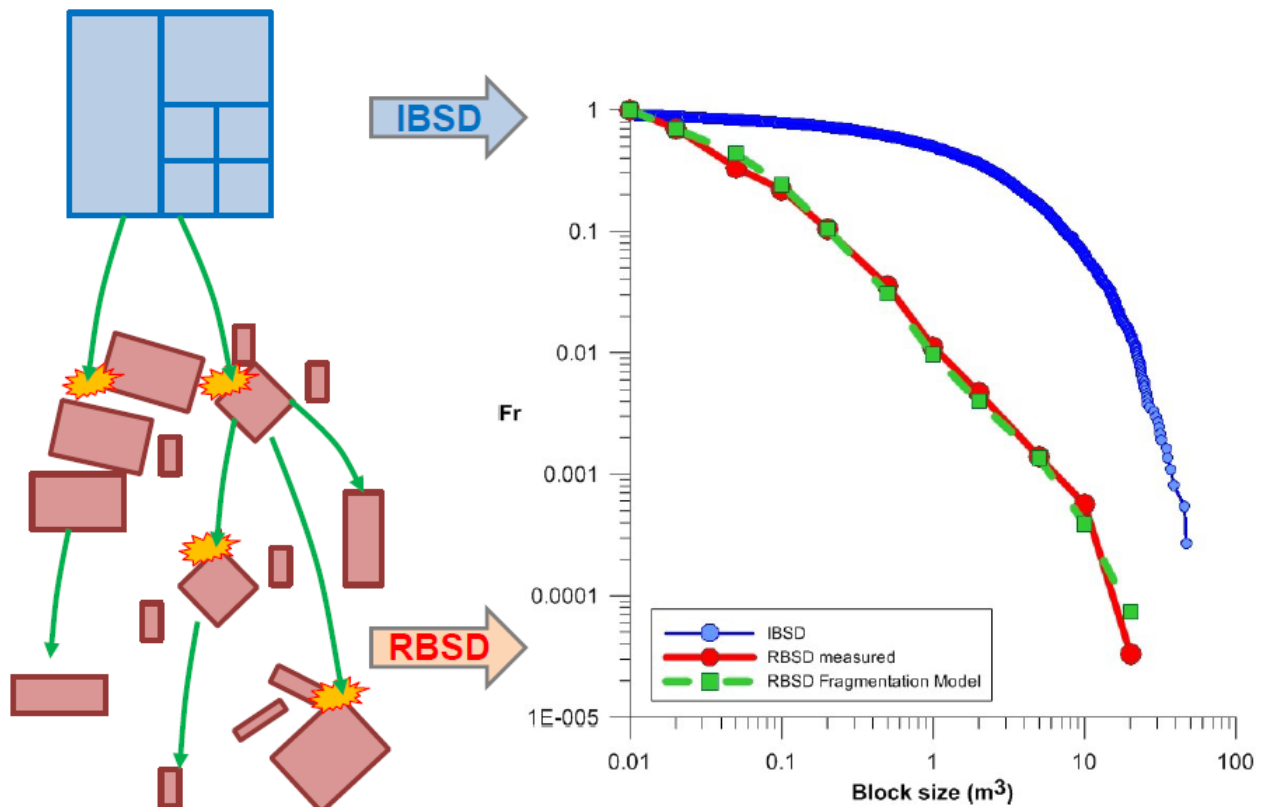


Figura 1.1. Esquema del RockFall Fractal Fragmentation Model (RFFM) a utilizar en el caso de Isona

El modelo supone una distribución fractal de volúmenes de bloques, por lo que es de vital importancia la estimación del volumen inicial involucrado, para poder obtener resultados válidos de la fragmentación de bloques.

Considerando el modelo como invariante a la escala, es decir, con el mismo comportamiento en distintos órdenes de magnitud, a veces es complicado ajustar los resultados del modelo a los extremos de las distribuciones reales medidas. Además, se identifican algunas limitaciones a la hora de la conservación del balance de masa (debido al uso de *bins* o compartimentos a la hora de estudiar la distribución de volúmenes) y las limitaciones para reproducir algunas formas de RBSD irregulares en la zona de estudio utilizando el modelo presentado por Ruiz-Carulla et al (2017).

Se detallan algunas mejoras para modificar la formulación conservando el bloque de trabajo de balance de masa, e implementando el comportamiento de escala variable que permite la capacidad de reproducir RBSD con formas irregulares.

El estudio realizado en el presente trabajo puede servir para aumentar el conocimiento sobre los procesos de fragmentación, para así optimizar las medidas de protección, como pueden ser barreras dinámicas, en base no solo a las energías de impacto, sino también al número de bloques que forman parte del proceso. En realidad, un solo bloque puede producir cientos de fragmentos después del impacto, como se observa en pruebas a escala real (Gili et al., 2016).

2. Estado del arte

2.1 Desprendimientos rocosos

Como ya se ha mencionado en la presente tesina, tanto los desprendimientos rocosos como las avalanchas de rocas son eventos extremadamente rápidos que recorren largas distancias. Es por esto, por lo que hace prácticamente nulas las posibilidades de tomar acciones evasivas cuando el evento ocurre (Volkwein et al., 2011), apareciendo el riesgo de daños materiales, y lo que es peor, personales. Por lo tanto, en la mayoría de ocasiones, son necesarias medidas de protección para minimizar estos daños en la medida de lo posible.

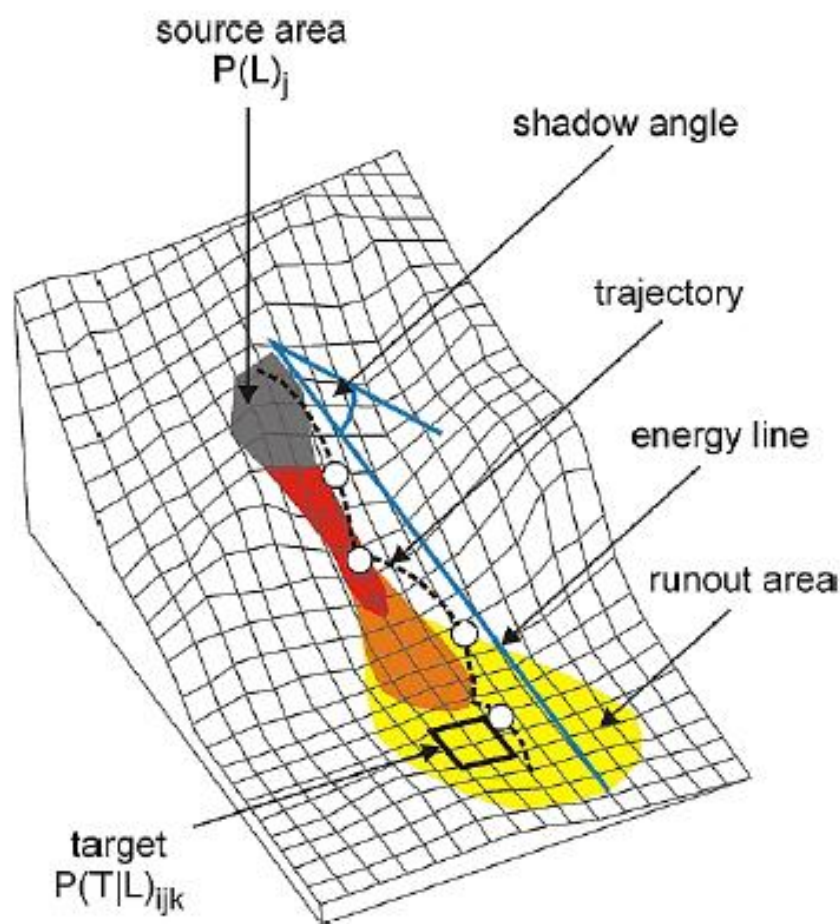


Figura 2.1. Ilustración gráfica de los desprendimientos rocosos y parámetros relacionados. (Jaboyedoff et al, 2001).

Como se muestra en la figura 2.1, los bloques de roca se desprenden del talud con un ángulo inicial, siguiendo una trayectoria hasta acabar en el depósito (sobre el cual se realizarán estudios para conocer el comportamiento del desprendimiento).

Es muy útil el estudio de la longitud recorrida por los desprendimientos rocosos en laderas, con el objetivo de optimizar tanto la medida de protección a utilizar, como también su posición a lo largo de la propia ladera. Sin embargo, la distancia recorrida es muy compleja porque depende de muchas interacciones entre diferentes procesos físicos. Estos eventos físicos pueden ser: fricción interna del material, fragmentación de los bloques de roca y disipación de energía a lo largo de la trayectoria del desprendimiento (Shugar et al., 2013). Por lo tanto, predecir esta distancia no es tarea fácil, añadiéndole además los pocos conocimientos que se tienen sobre el desplazamiento del centro de gravedad del desprendimiento. En la figura 2.2 se presentan los diferentes parámetros que entran en juego en un desprendimiento rocoso.

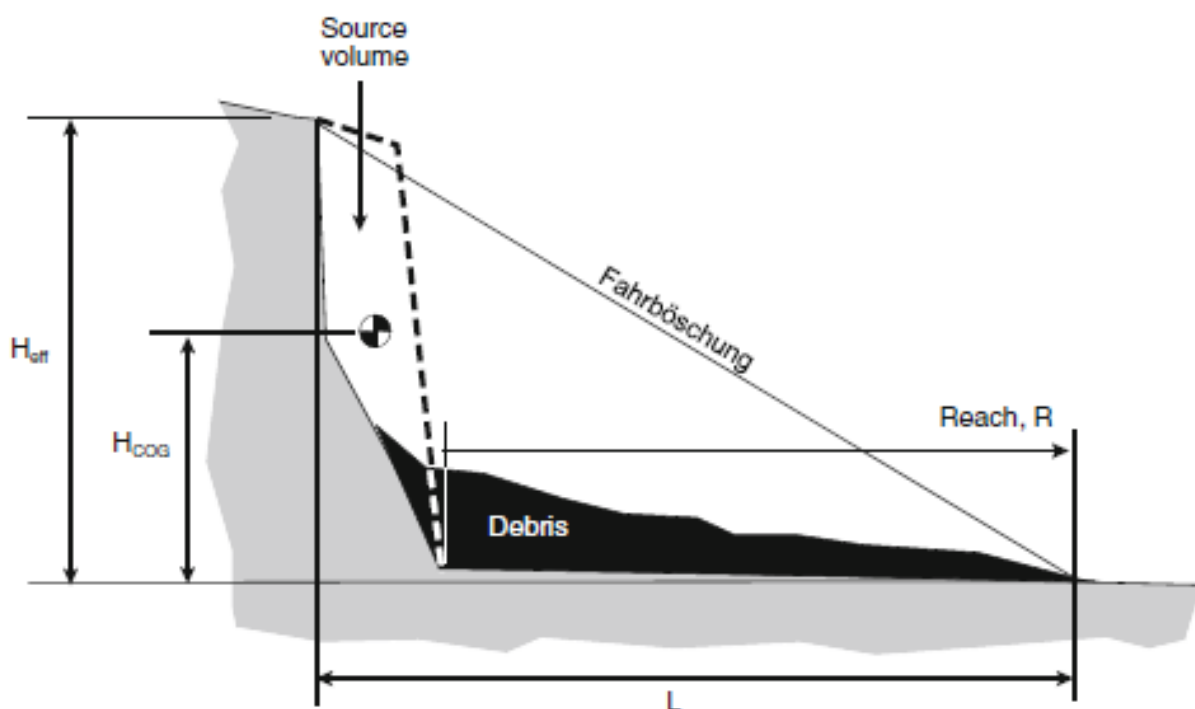


Figura 2.2 Definición de los parámetros morfológicos de un desprendimiento rocoso. (E.T. Bowman et al., 2014)

En consecuencia, actualmente se realizan estudios con este fin, mejorar el conocimiento de la trayectoria del centro de gravedad y la distancia que recorrerá el desprendimiento de roca a lo largo de toda la ladera (Charière et al., 2015). Estos estudios determinan el grado de fragmentación definiendo un tamaño de bloque de roca característico, teniendo en cuenta el tamaño inicial y el tamaño del bloque de roca de mayores dimensiones. Se ha demostrado que el grado de fragmentación depende de la cohesión del material en base a una ley potencial (Haug et al, 2016). Los resultados de dichos estudios demostraron también que el desplazamiento del centro de masa se reducía con el grado de fragmentación, lo que concuerda con que el proceso de fragmentación conlleva una disipación de energía.

Un estudio realizado por Di Crescenzo et al (2007) en la península de Sorrento, al sur de Italia, utilizó diferentes campos de la ingeniería geotécnica con la intención de elaborar un mapa de susceptibilidad a desprendimientos rocosos en taludes. En la zona predominaba caliza (en general dolomita) del Mesozoico. El objetivo principal de este estudio era prever posibles desprendimientos en zonas urbanas para así disponer de medidas de protección suficientes para evitar posibles daños. Es de interés la metodología adoptada en este estudio, la fotogrametría.

Inicialmente, se utilizó fotogrametría terrestre para la topografía frontal, lo que ofreció resultados muy eficaces de la zona. Combinando este método con la comparación de diferentes mapas del ámbito geológico (mapas geológicos, geomorfológicos y geoestructurales) se obtuvo el mapa de susceptibilidad citado anteriormente. Este método semi-cuantitativo ofreció una buena precisión a la hora de conocer el potencial de la zona a sucesos de desprendimientos rocosos.

La ventaja principal de este proceso utilizado en Sorrento es que era de simple ejecución, aunque requería el uso de la fotogrametría y análisis geoestructurales del talud. Un trabajo multidisciplinar que combinaba los ámbitos tradicionales de la geología con estudios de la ingeniería geológica. El procedimiento se basaba en el estudio de la inestabilidad del talud gracias a la información obtenida por la fotogrametría, representada en mapas de gran precisión.

2.2 Fragmentación en desprendimientos rocosos

El desprendimiento fragmentario de roca es el evento en el cual los fragmentos se mueven independientemente unos de otros comportándose como sólidos-rígidos a lo largo de la trayectoria debido a los impactos con el terreno. Una avalancha de rocas, sin embargo, es cuando el desprendimiento se comporta como un flujo.

Es de vital importancia el estudio y conocimiento del volumen inicial del desprendimiento en el análisis de las trayectorias (Hung et al., 1999). Al utilizar el volumen inicial de la roca, se suelen sobreestimar resultados, como puede ser la energía cinética, por lo que se recomienda utilizar el volumen del mayor fragmento, lo que da resultados más realistas (Okura et al., 2000). El indicador que se usa para conocer la fragmentación de un desprendimiento es la *Rockfall Rock Size Distribution* (RBSD). En la RBSD entran muchos parámetros en juego: discontinuidades, orientación, apertura de las fisuras, consistencia, ángulo de impacto, rigidez...

Para la investigación de nuevos modelos de desprendimientos rocosos es requerido realizar inventarios de casos reales. Obtener un inventario completo es muy difícil, debido a la gran cantidad de bloques que pueden verse involucrados en un desprendimiento (Ruiz-Carulla et al., 2015). Actualmente se utilizan técnicas como la fotogrametría para facilitar la obtención de los inventarios, aunque este análisis suele hacerse en base a las áreas de los bloques y no a los volúmenes.

En el caso de desprendimientos de tamaño medio-alto (10^3 - 10^5 m³) se genera una capa de derrubios (denominada *young debris cover, YDC*) (Ruiz-Carulla et al., 2015). Es muy complicado (debido a la gran cantidad de fragmentos) obtener la RBSD en desprendimientos en los que existe una capa continua de derrubios de gran volumen (Ruiz-Carulla et al., 2015). Para ello, se pueden combinar dos métodos: el muestreo selectivo del YDC o el análisis sistemático de la medida de los bloques grandes (Dussauge et al. 2003; Pickering et al. 1995; Clauset et al. 2009). Gracias a la visualización en campo e interpretaciones de las ortofotos se suele dividir el YDC en zonas de bloques de roca de tamaños similares (figura 2.3), en los que se efectúa un muestreo por parcelas.

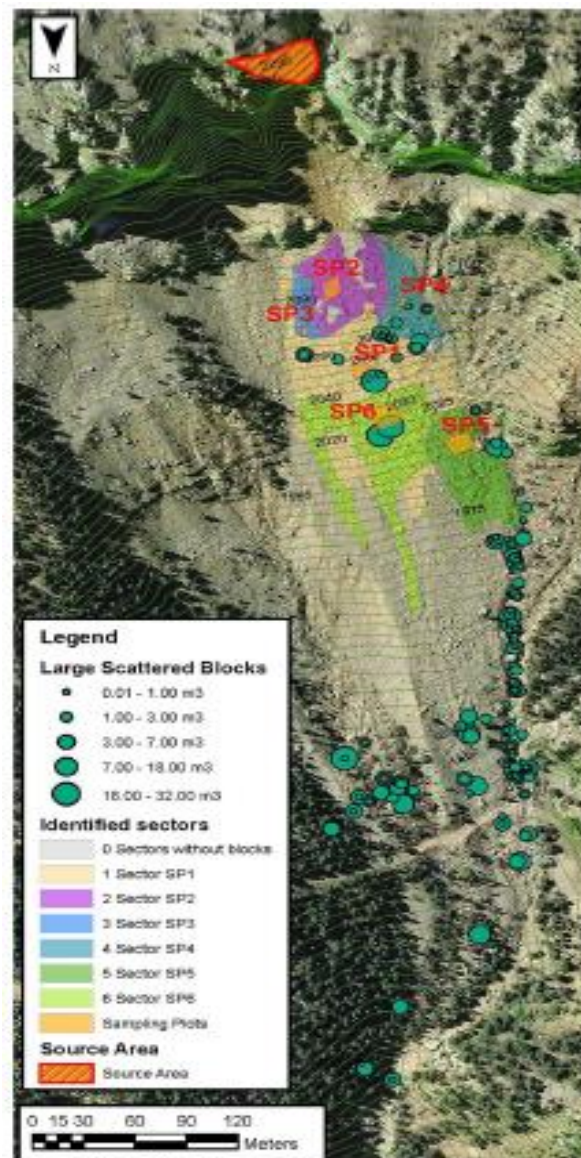


Figura 2.3. Ortofoto del desprendimiento de Cadí massif (al este de los Pirineos) en 2011, se distinguen diferentes zonas homogéneas en el debris cover y depósito. (Ruiz-Carulla et al., 2015)

En el cálculo de volúmenes de bloques grandes, se asume que los bloques son de forma prismática, haciendo medida de tres longitudes ortogonales. La RBSD será la suma de los dos métodos, con sus respectivas correcciones.

Como ya se ha comentado, es muy importante el análisis del depósito creado por el desprendimiento rocoso, ya que es la herramienta que permite conocer con mayor fiabilidad la distribución de los tamaños de bloques, pudiendo así interpretar el proceso de fragmentación. Por lo tanto, se trata de encontrar modelos de fragmentación que

sean capaces de relacionar de manera coherente el estado inicial del talud, con la distribución de bloques de roca albergados a lo largo de todo el depósito.

En la mayoría de casos, la fragmentación sigue una distribución fractal en base a una dimensión fractal denominada D. Esta afirmación da lugar a la evidencia de que el proceso de fragmentación es invariante a distintas escalas (Perfect et al., 1997)). Estos mismos modelos fractales se han utilizado en el estudio de cráteres lunares y meteoritos debido a su gran similitud con la fragmentación de desprendimientos rocosos. Esto fue demostrado por Donnison y Sugden en 1986 al determinar la relación entre la frecuencia y el tamaño de meteoritos y asteroides.

La dimensión fractal D de una montaña o ladera puede obtenerse mediante mapas topográficos, ya que el perímetro (P) de la montaña (también considerado como longitud) está relacionado en base a esa dimensión fractal D con la longitud de medida (l) (Turcotte, 1986).

Turcotte en 1986 utilizó la figura 2.4 con el fin de explicar este tipo de modelos basados en la dimensión fractal D y demostrando que la fragmentación es invariante a distintas escalas.

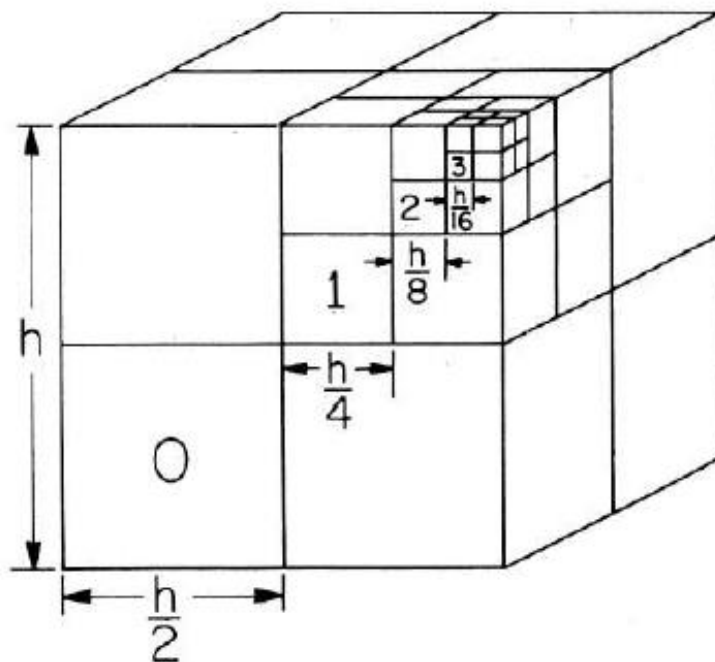


Figura 2.4. Ilustración de modelos fractales de fragmentación. Permite demostrar que fragmentación es invariante a la escala. (D.L. Turcotte, 1986)

En base a la figura 2.4, un cubo de lado h es dividido en 8 partes con dimensiones $h/2$, teniendo una probabilidad de P_c de que ese cubo se divida en esas 8 partes iguales. Esos fragmentos con lado $h/2$ son denominados de primer orden, teniendo a su vez la misma probabilidad P_c cada uno de ellos de dividirse en otras 8 partes iguales de dimensiones $h/4$, creando bloques de segundo orden, sucesivamente. Esto es la explicación de que la fragmentación es invariante a la escala (Turcotte, 1986).

Sin embargo, en modelos invariantes a distintas escalas, se observa que los valores de D_f (distribución fractal) obtenidos en la simulación en ocasiones no se ajustan a los valores tipo de los materiales estudiados (Perfect et al., 1992; Eghball et al., 1993; Wu et al., 1993). La explicación de estas anomalías en los resultados es que se asume el modelo como invariante a distintas escalas. Perfect (1993) investigó un modelo alternativo que proponía que la probabilidad de rotura era variante a escala, mediante una distribución hiperbólica parecida a la propuesta por Mandelbrot (1982).

Locat et al, en 2006, estudiaron la fragmentación de avalanchas de rocas en montañas en Canadá. Utilizaron dos métodos para determinar la energía de fragmentación, una basada en la propia teoría de fragmentación de roca y otra similar a la utilizada en la industria minera, la cual es la madre del conocimiento en desprendimientos rocosos, a la hora de calcular energías de explosión. Los resultados mostraron que, para las avalanchas de roca estudiadas, existe relación entre la razón de reducción de diámetro (que es la relación entre el diámetro medio de la roca intacta y el diámetro medio de los bloques en el depósito) y la energía potencial por unidad de volumen normalizada respecto a la resistencia a carga puntual de la roca (Locat et al., 2006). También se concluyó que para estos estudios la energía de fragmentación se aproximaba al 20% de la energía potencial, aunque esto necesitaba de más estudio futuros para su demostración.

Por lo tanto, se probaba que las relaciones empíricas se podían usar para definir el índice de desintegración, como ya proponían Vaunat y Leroueil en 2002. Esto resultaba en que la reducción del diámetro era función de la energía disipada y la resistencia de la roca, lo que permitió adquirir conocimiento en el proceso de fragmentación, suponiendo un gran avance para los futuros estudios en el tema.

También son de interés algunos trabajos experimentales (Tavallali et al., 2010) en el que se pretende conocer la influencia de la anisotropía de la roca en el proceso de fragmentación. Se realizan ensayos de laboratorio controlados de muestras de roca con planos de estratificación claros, con el fin de analizar la relevancia en el proceso de fragmentación de parámetros como el ángulo de impacto y orientación. La dirección de impacto respecto a un plano de debilidad de anisotropía produce diferentes resultados. Tavallali (2010) analiza el efecto de la orientación de la capa mediante ensayos brasileños, observando una longitud de fractura mayor y una reducción de energía requerida al alinearse las fuerzas aplicadas y los planos de estratificación de las muestras (areniscas). Puede simularse como un bloque de roca sedimentaria que se golpea con un martillo alineado o no a los planos predominantes de debilidad (figura 2.5). Las masas rocosas reales pueden tener múltiples planos de debilidad, relacionados con la génesis del material y con el mayor esfuerzo sufrido. Por lo tanto, la probabilidad de obtener una dirección de impacto más o menos eficiente puede estar relacionada con el número de anisotropías, el bloque y su forma.

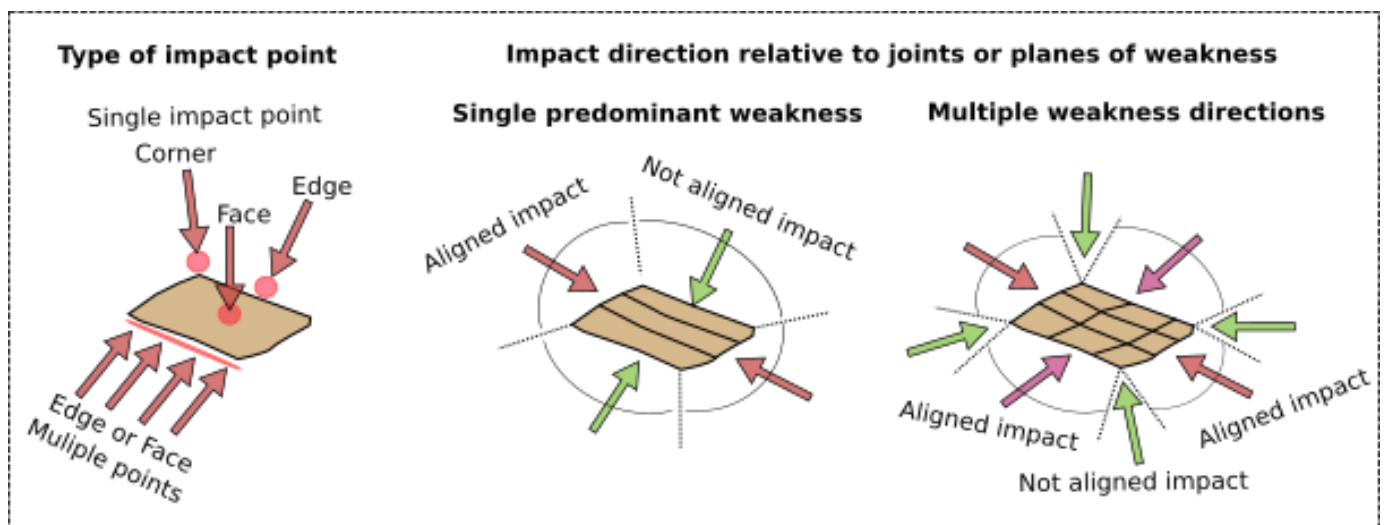


Figura 2.5. Impactos únicos o múltiples en un bloque de roca y diferentes ejemplos de direcciones de impacto en relación a los planos de debilidad. (Ruiz-Carulla, 2016).

2.3 Metodologías para la caracterización del desprendimiento (IBSD, RBSD)

Actualmente los análisis de estabilidad en taludes rocosos requieren del conocimiento geométrico de la estructura del talud, además de las tradicionales características mecánicas y de comportamiento del material y sus discontinuidades. Las propiedades mecánicas se obtienen comúnmente en ensayos de laboratorio, incluso a veces vienen acompañadas de ensayos in situ del macizo rocoso. En cambio, las características geométricas mencionadas anteriormente requieren de medidas en campo, por lo que muy frecuentemente pueden aparecer zonas difícilmente accesibles para realizar la medición por métodos geológicos tradicionales. Se han utilizado análisis estadísticos (Kim et al., 2007) para la obtención de dichos datos inaccesibles, lo que supone una estimación de las características reales del macizo.

Las discontinuidades o juntas presentes en un macizo rocoso pueden determinar la fragmentación en el desprendimiento de un talud. Características como la apertura de las juntas, orientación de las discontinuidades, distribución de las fisuras por todo el macizo o la misma resistencia del material son cruciales a la hora de determinar la distribución de los tamaños de los bloques de roca en un desprendimiento rocoso (Dussauge et al. 2013).

Sin embargo, en la mayoría de modelos de distribuciones de roca se suponen una alta persistencia de juntas a lo largo de todo el macizo rocoso, por lo que puede llegar a subestimarse los tamaños de los bloques generados en el desprendimiento (Kim et al., 2007). En la figura 2.6 se muestra las diferencias en persistencia de juntas en macizos rocosos.

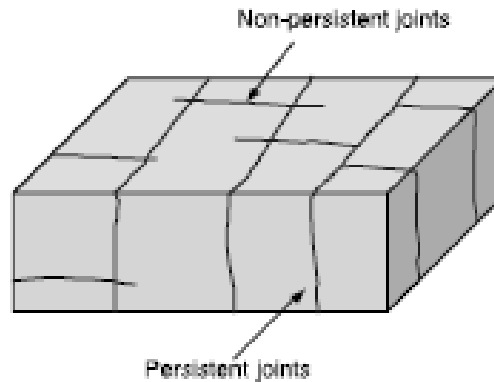


Figura 2.6. Ilustración de la persistencia de juntas en un macizo rocoso. (B.H. Kim et al., 2007)

Además, una mala caracterización del macizo y sus propiedades pueden dar lugar a una sobreestimación de la energía de los desprendimientos rocosos y de las medidas de seguridad necesarias en la zona, lo que supone un aumento del gasto. Incluso estas erróneas suposiciones pueden dar lugar al caso contrario, una sobreestimación de la resistencia de la roca. Esto es un error grave, ya que pueden generarse desprendimientos rocosos mayores que los supuestos, por lo que las medidas de protección serán insuficientes, pudiendo esto ocasionar daños materiales y, en los peores casos, daños personales.

Para solventar este tipo de situaciones están en auge diferentes análisis cuantitativos (Cai et al., 2004) (en lo que a distribución de tamaños de bloques de roca se refiere) basados en el Índice de Resistencia Geológica para una correcta clasificación de la roca y, en consecuencia, diseñar de manera óptima las medidas de protección necesarias. Este análisis, en combinación con análisis más complejos con la utilización de modelos 3D que tienen en cuenta la orientación de las discontinuidades, su persistencia y distribución en el macizo, dan lugar a resultados muy competitivos y realistas (Kim et al., 2007).

Por lo tanto, en un desprendimiento de roca, el conocimiento de las características, tanto mecánicas como estructurales, del propio talud, pudiendo ser ayudadas por análisis estadísticos y técnicas de monitorización, permiten conocer el colapso, la fragmentación de los bloques de roca y la propagación de los mismos a lo largo de la ladera (Cai et al., 2004).

Resumiendo, las juntas y discontinuidades de un macizo rocoso en general determinan la fragmentación de dicho macizo en un desprendimiento a lo largo de un talud. El conocimiento del tamaño de bloques, tanto como la dirección y velocidad de dichos bloques en el desprendimiento, es el factor determinante a la hora de establecer la vulnerabilidad de las estructuras y de las medidas de protección.

La fotogrametría terrestre o las técnicas de escaneo láser son una solución muy válida para solventar este tipo de problemas a la hora de analizar un talud con zonas de difícil acceso de una manera segura y eficaz. La precisión y eficacia de estos métodos ha quedado más que demostrada (Haneberg et al., 2006; Jaboyedoff et al., 2008; Lato et al., 2009) (en lo que a resultados se refiere) debido a la gran cantidad de información geométrica y geológica que se registra, con la cual, se facilita la modelización numérica del comportamiento del macizo rocoso en caso de inestabilidad.

En la actualidad, el uso de sensores con control remoto es un método muy utilizado a la hora de analizar posibles desprendimientos que puedan causar daños personales o daños materiales a la infraestructura. Principalmente, dentro de este tipo de métodos, los más utilizados son el LIDAR y la fotogrametría ya mencionada. Ambos tienen sus ventajas y desventajas, por lo que lo conveniente es complementarlos y tener una cantidad de información más precisa (Sturzenegger et al., 2009). Además, se han desarrollado numerosas herramientas comerciales para procesar y analizar toda esa información, incluso pudiendo realizarse análisis cinemáticos de estabilidad (Firpo et al., 2011).

Sin embargo, parámetros como la apertura de grietas o rugosidad a pequeña escala son muy difíciles de determinar con este tipo de técnicas, por lo que es recomendable complementar esta información mediante técnicas manuales más convencionales.

El LIDAR es un aparato que permite calcular la distancia entre el sensor y un objeto visible mediante la medida del tiempo que tarda una onda en reflejarse en el objeto y ser captada por el sensor de nuevo. Los resultados se muestran mediante una nube de puntos, en la que cada punto tendrá sus propias coordenadas en las tres dimensiones. Cabe destacar que la técnica LIDAR es sencilla de ejecutar, con resultados muy visibles y directos (Buckley et al., 2008).

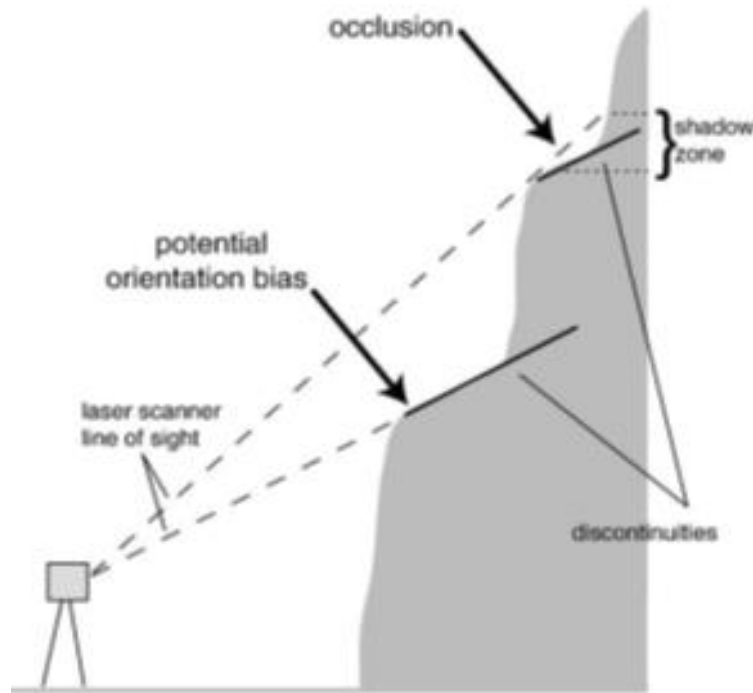


Figura 2.7. Ilustración gráfica de zonas de sombra en el uso de técnicas de escaneo láser. (M. Sturzenegger et al. 2009)

Sin embargo, en este tipo de tecnología (mayormente en LIDAR terrestre), existen casos en los que hay zonas en las que la geometría del talud no permite su medida, por lo que aparecen las denominadas “sombras”, que son zonas con falta de datos. En la figura 2.7 se observa un ejemplo de un talud con falta de datos por oclusión.

Por otro lado, la fotogrametría es una técnica la cual lleva muchos años de desarrollo (Atkinson et al., 1996). Sin embargo, hace considerablemente poco tiempo que este método ofrece resultados comparables a los de otras técnicas (como el LIDAR) (G. Firpo et al., 2011). Por regla general, la fotogrametría se basa en el concepto de comparar dos imágenes solapadas, calculando mediante triangulación la localización de los puntos y generando la nube de puntos final. La precisión planimétrica es muy competente, mientras que la precisión de la tercera coordenada es en base a la relación entre la distancia entre los diferentes sensores (cámaras de gran resolución) y la distancia entre los sensores y los objetos a medir. La máxima precisión se alcanza con una relación de 1:1, aunque es más común relaciones del tipo 1:2 a 1:7. La fotogrametría es independiente a la escala, ya que se trata de datos de color en una imagen ortorectificada, por lo que se complementa bien con el LIDAR (Sturzenegger et al., 2009).

Cabe destacar que la fotogrametría ofrece mucha información, y posibilita la recogida de información en lugar poco visibles o accesibles, facilitando así el estudio y evitando riesgos al personal que analizar el lugar, ya que no tendría que acceder a estos lugares. La fotogrametría no solo ayuda en el conocimiento de las discontinuidades del macizo rocoso, sino que también permite conocer la dirección y el buzamiento de las diferentes capas del estrato, dando así una información muy completa, de una manera relativamente sencilla y segura.

Por lo tanto, la información recogida mediante fotogrametría puede ser visualizada y analizada como ortofotos o como modelos 3D, fácilmente manejables y muy aptos para clasificar taludes en categorías de peligrosidad y/o riesgo, creando así herramientas útiles para análisis de seguridad y facilitando la toma de decisiones (Salvini et al., 2013). Gracias a estos modelos 3D, se es capaz de caracterizar el macizo rocoso y los bloques de roca que puedan desprenderse, así como sus posibles trayectorias a lo largo del talud. Los resultados se muestran en mapas de riesgo y susceptibilidad, en donde se recogen datos estadísticos de distribuciones de bloques, su energía cinética a lo largo de las trayectorias y su interacción con las medidas de protección existentes.

Sin embargo, la técnica de la fotogrametría terrestre también tiene sus inconvenientes, ya que su campo de visión es limitado, al ser un objeto inmóvil, por lo que es posible tener la necesidad de realizar diferentes barridos colocando los aparatos en diferentes posiciones para obtener una información más completa.

Hoy en día, con el fin de reducir los costes operacionales y los tiempos de actuación, además de solventar los inconvenientes del campo de visión, se están utilizando vehículos aéreos autónomos, normalmente drones, con vuelos programados (Firpo., 2011). Además, se facilita al dron un sistema GPS para obtener datos georreferenciados.

Es de interés la utilización de la fotogrametría simultáneamente con sistemas GPS para la medida del área de los deslizamientos y estimar el volumen involucrado en el movimiento (Gómez et al., 2014). Se trata de utilizar estas técnicas para monitorizar el movimiento de un talud. Se analizan diferentes puntos del mismo, midiendo la posición de ellos con una frecuencia de pocos minutos y una precisión centimétrica (actualmente hay posibilidad de incluso precisión milimétrica). Gracias a esta medida casi continua del

estado del talud y la evolución del mismo se ofrece la posibilidad de realizar análisis cinemáticos en él y gestionar el riesgo de los deslizamientos que se pudieran generar.

Ruiz-Carulla et al (2017) proponen un modelo fractal de fragmentación (*RockFall Fractal Fragmentation Model*, RFFM) para explicar el proceso de fragmentación de un desprendimiento rocoso. Este modelo parte de un volumen inicial (IBSD) el cual podrá sufrir disgregación durante los primeros instantes de ocurrir el desprendimiento (antes del primer impacto con el terreno), tratando de obtener un resultado final que se asemeje a las medidas de campo realizadas para la caracterización del depósito (RBSD). La figura 2.8 muestra un ejemplo de disgregación de la masa de roca al desprenderse debido a inestabilidad. La masa ha sufrido una total disgregación por el conjunto de discontinuidades debido a que no hay suficiente cohesión en las juntas para garantizar la unión de los bloques.



Figura 2.8. Secuencia extraída del video “Major Rock Fall Occurs Next to a Climber in Chulilla, Spain, en la plataforma Youtube. Se muestra una disgregación de la masa de roca, que caracterizará la IBSD.

En la figura 2.9 se analiza los efectos de la disgregación y de la rotura, tanto como la combinación de ellos, dados en un desprendimiento rocoso sobre la IBSD y la RBSD. En el caso de aparecer solo disgregación del material, es decir que la energía de impacto no será suficiente como para romper los bloques del desprendimiento y se disgregarán en base al patrón de discontinuidades, el IBSD será la misma que la RBSD, ya que en el depósito se hallarán los mismos bloques iniciales. En el caso de darse solo rotura y no disgregación, la IBSD será de solo un bloque de salida, el cual constituirá el volumen total

del desprendimiento, que se fragmentará dando lugar a una distribución de fragmentos de bloque en el depósito (RBSD). Sin embargo, el caso más común es la combinación de ambos procesos, por lo que se debe analizar tanto el patrón de discontinuidades que define la disgregación como el proceso de fragmentación de los bloques de roca al impactar con el terreno.

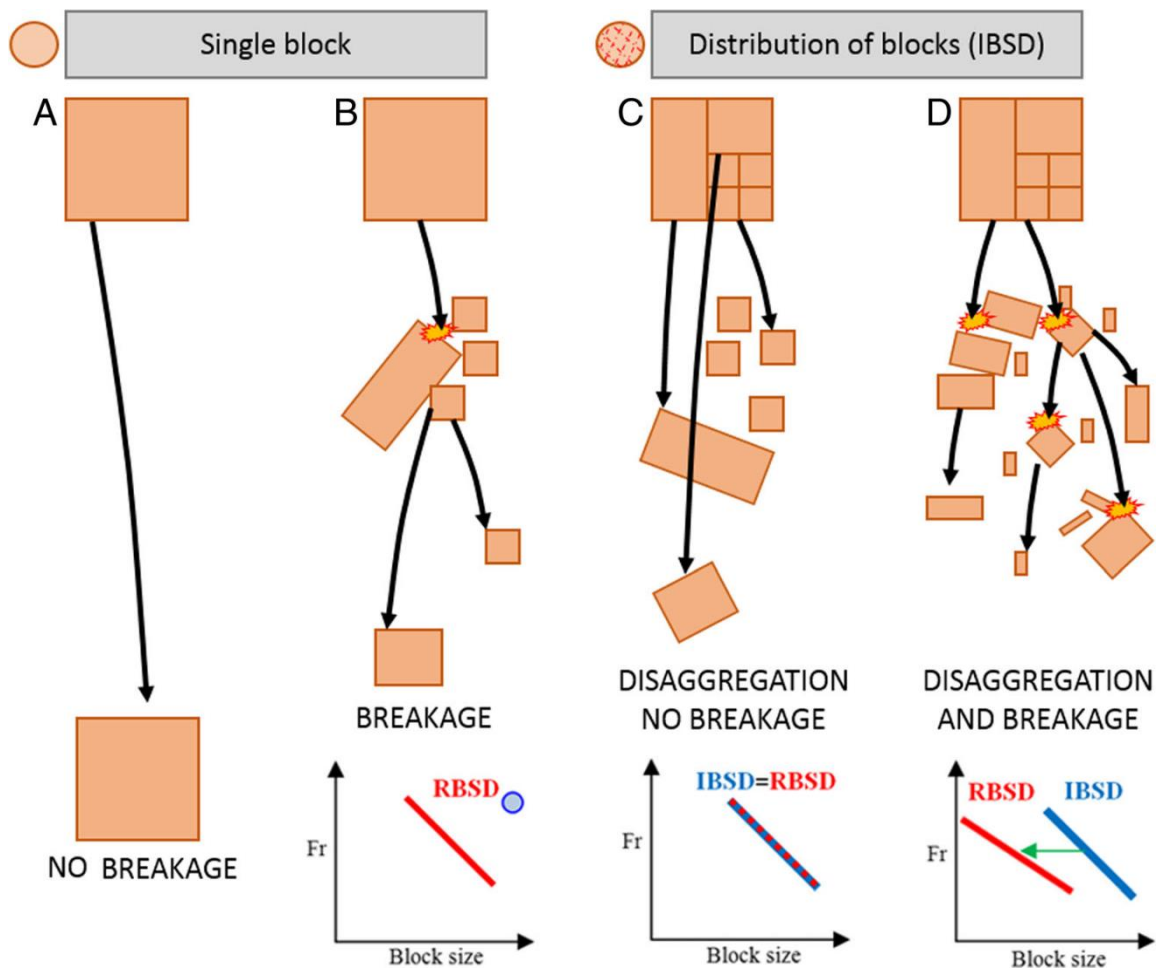


Figura 2.9. Efectos de la disgregación y de la rotura en desprendimientos rocosos. (R. Ruiz et al., 2017).

El *RockFall Fractal Fragmentation Model* (RFFM) trata de simular el proceso de fragmentación de los bloques de roca desprendidos, para obtener una RBSD final del modelo que se ajuste a la RBSD medida en el depósito en campo. Se parte de una IBSD definida por las familias de discontinuidades, la cual es analizada en la cicatriz del desprendimiento (Ruiz-Carulla et al., 2017).

3. Objetivos

La presente tesina tiene como objetivo el estudio de un desprendimiento rocoso, el cual forma parte de un conjunto de inventarios de desprendimientos de roca en el marco del proyecto RockRisk (ahora denominado RockModels). El desprendimiento rocoso a estudiar se localiza al norte de la provincia de Isona (Lleida), más concretamente en d'Abella de la Conca, Pallars Juss. Dicho evento se dio lugar a principios del 2006.

Por lo tanto, se trata de caracterizar el desprendimiento rocoso de Abella de la Conca y también el proceso de fragmentación de la masa de roca. Los objetivos principales establecidos en esta tesina son:

- **Estimación del volumen total del desprendimiento rocoso y la *In situ Block Size Distribution* (IBSD).**

Correlacionando medidas en el depósito del desprendimiento, medidas en la cicatriz de la pared rocosa y la reconstrucción del volumen desprendido, se trata de realizar una aproximación del volumen total involucrado en este evento. Por otro lado, caracterizando el patrón de discontinuidades en la cicatriz del desprendimiento, se estima la IBSD.

- **Obtener la *Rockfall Block Size Distribution* (RBSD) en el depósito del desprendimiento.**

Comparando los resultados de diferentes datos de partida, se trata de analizar la distribución de los volúmenes de bloques de roca existentes en el depósito del desprendimiento. Después de producirse el desprendimiento, conceptualmente los bloques de roca desprendidos y fracturados tienden a una distribución en base a una ley potencial.

- **Calibración del modelo de fragmentación.**

Se tiene como objetivo calibrar un modelo de fragmentación que determine y defina el proceso de fragmentación del desprendimiento a lo largo de toda su trayectoria. Este modelo de fragmentación parte de un volumen inicial, para obtener finalmente la distribución de los volúmenes de roca finales en el

depósito. Se trata de comparar dicho resultado con los datos obtenidos en campo para mostrar si el modelo de fragmentación utilizado se corresponde con lo ocurrido en el evento.

- **Comparación de los resultados obtenidos con otros casos del inventario (*RockModels*).**

Por último, y de manera más general, se trata de ampliar el conocimiento de este tipo de fenómenos (desprendimientos rocosos), por lo que los resultados, tanto de distribución de volúmenes de bloques de roca como de parámetros del modelo de fragmentación, se comparan a casos ya estudiados anteriormente, dentro del marco del proyecto RockRisk (*RockModels*).

En la figura 3.1 se muestran resultados de distribuciones de volúmenes de bloques de roca en diferentes casos estudiados por los proyectos de *RockModels*. El objetivo por lo tanto es introducir los resultados obtenidos para el caso de Isona en este tipo de gráficos y compararlos a los demás casos, y analizar las similitudes entre ellos.

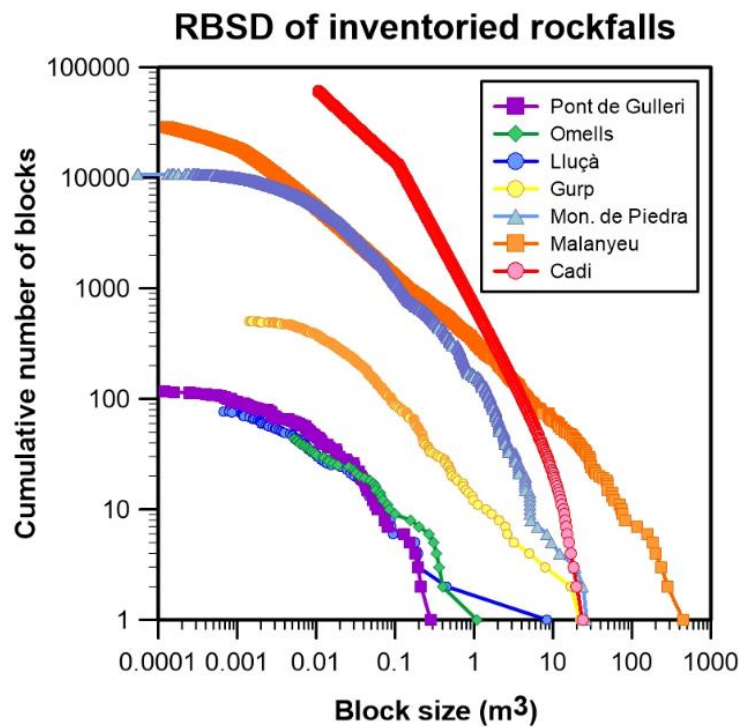


Figura 3.1. Gráfica cedida por Ruiz-Carulla. Distribuciones de volúmenes de bloques de roca medidos en los desprendimientos Pont de Gulleri, Lluçà etc en el marco del Proyecto RockModels.

4. Desprendimiento de Isona (Abella de la Conca)

El caso a analizar en la presente tesina se sitúa cerca de la localidad de Isona, en Lleida. Concretamente se sitúa en la Abella de la Conca (figura 4.1), en un talud en el que se encuentra una pared rocosa calcárea importante del cretácico superior, tal y como se muestra en el mapa geológico de la zona de estudio en la figura 4.2 (obtenido en el Instituto Cartográfico de Cataluña).

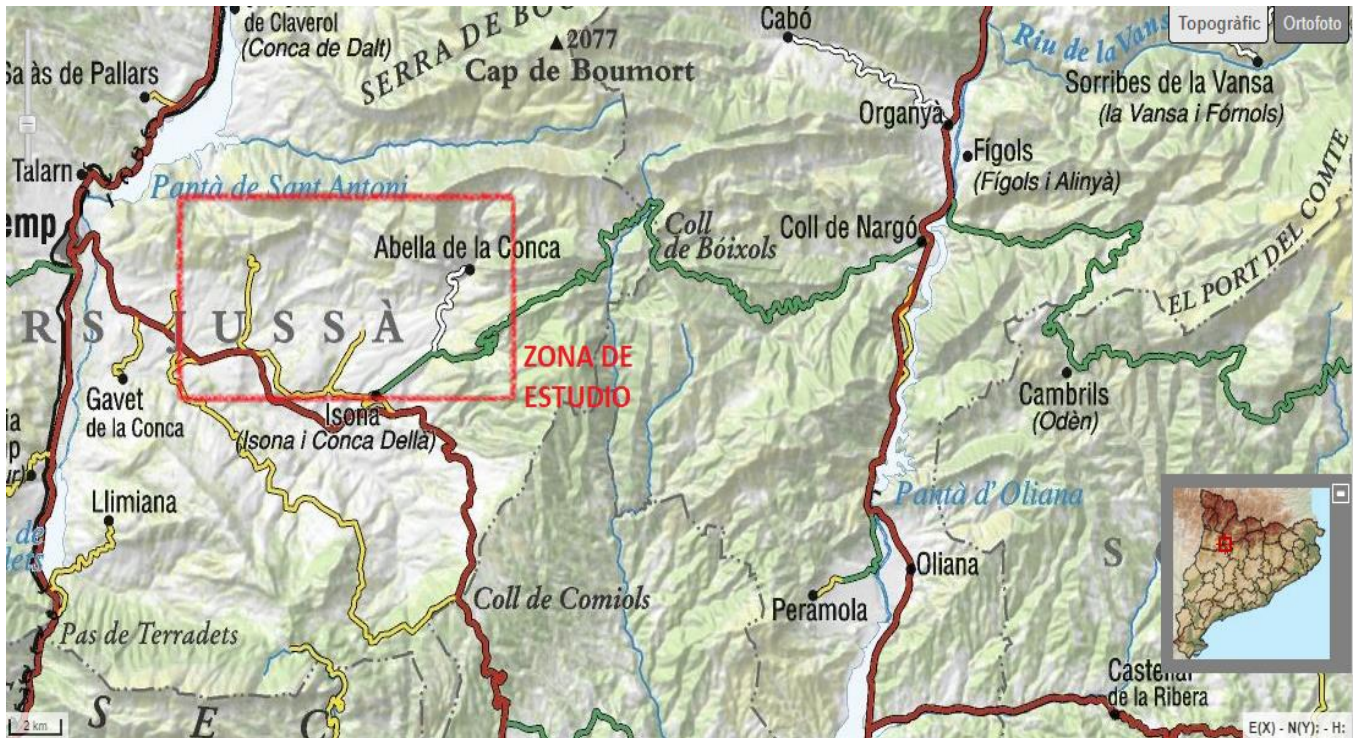


Figura 4.1. Localización del desprendimiento rocoso a estudiar en Isona, Lleida. (Instituto Cartográfico de Cataluña)

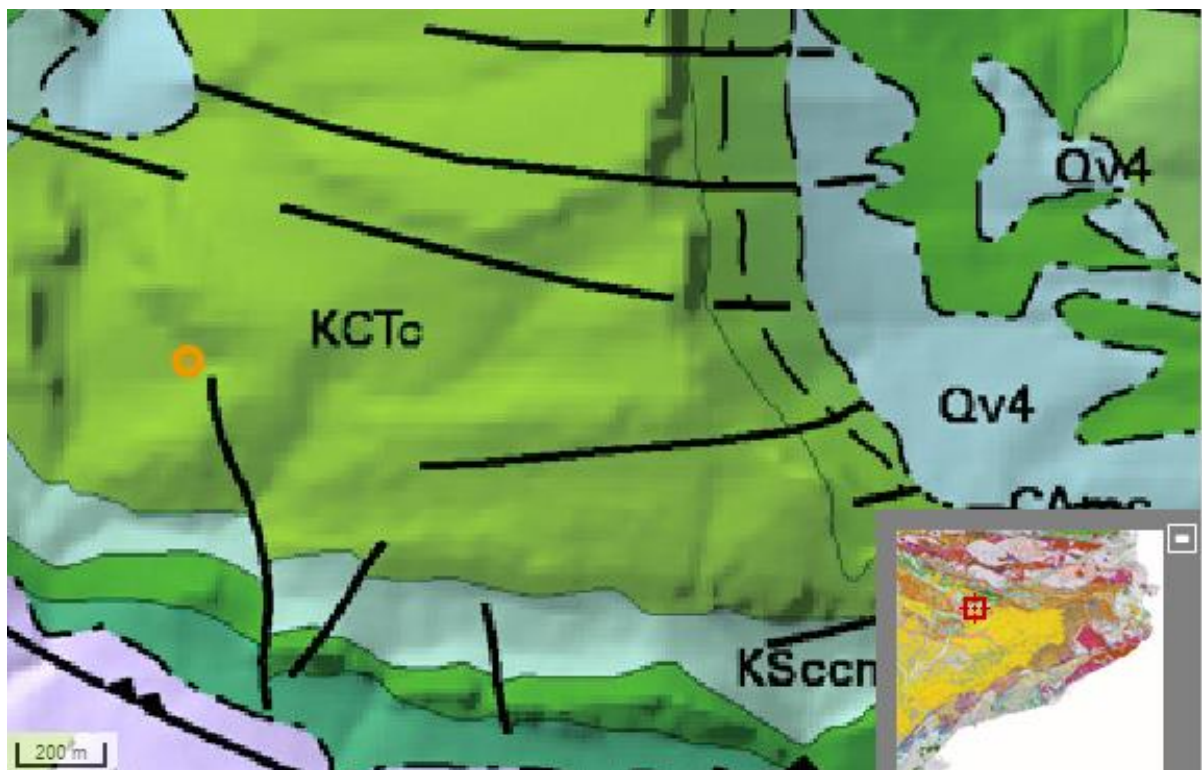


Figura 4.2. Mapa geológico de la zona de estudio. (Instituto cartográfico de Cataluña)

Leyenda:



Calcáreas, margas y dolomías amarillas.

Ubicación del desprendimiento

En la figura 4.3 se puede observar un mapa topográfico de la zona de estudio. En la misma se señala la zona de salida del desprendimiento rocoso (cicatriz) y el talud por el que se siguen las trayectorias de los bloques fragmentados. Este talud tiene una longitud de aproximadamente 350 metros, mientras que el depósito tiene una longitud similar a este talud pero una anchura de 90 metros. La cicatriz del desprendimiento tiene 40 metros de largo en la pared rocosa y una altura de 18 metros respecto de la base de la misma.

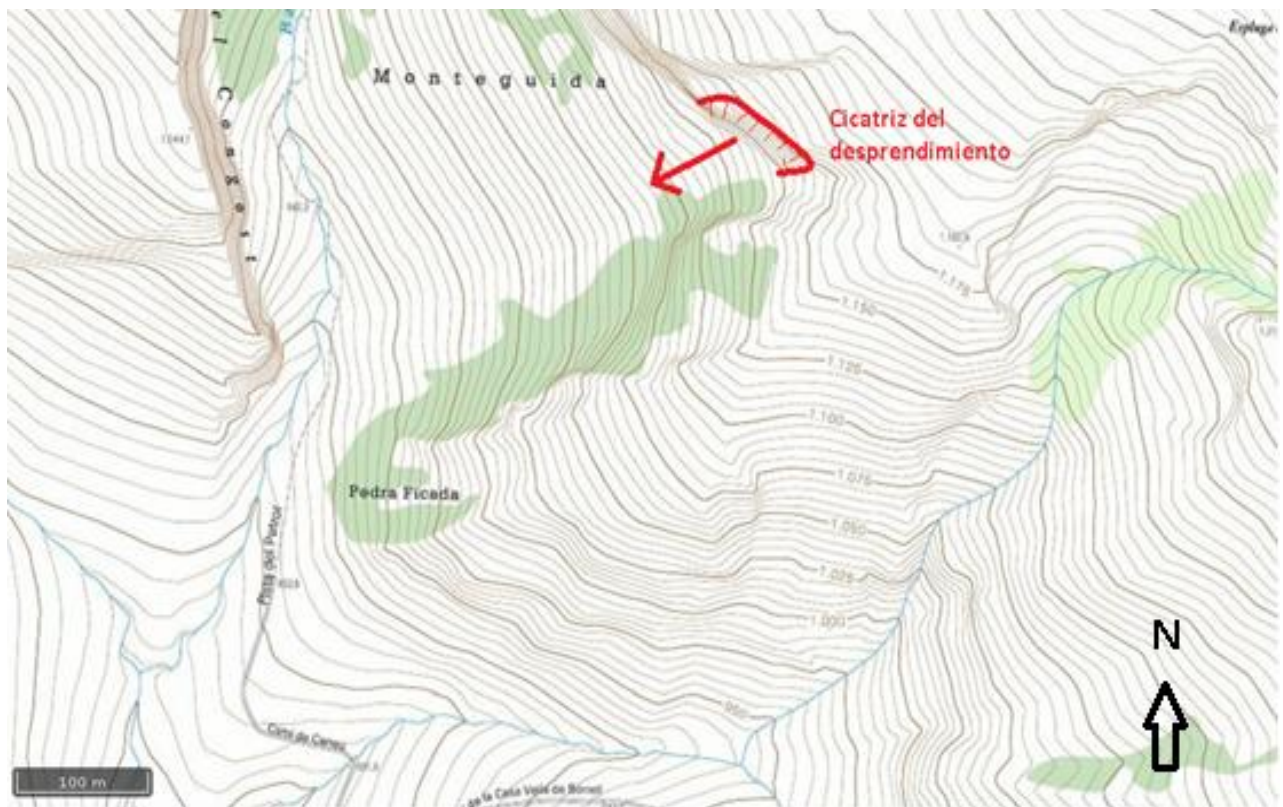


Figura 4.3. Mapa topográfico de la zona de estudio. (Instituto Cartográfico de Cataluña)

La figura 4.4 muestra una fotografía aérea general del desprendimiento rocoso, donde se observa la gran magnitud del evento y su amplio recorrido a lo largo del talud. El depósito mayoritariamente se concentra en la parte superior del talud (base de la pared rocosa), aunque existen bloques de volumen considerable que recorren cierta distancia

a lo largo del talud hasta detenerse. En la figura 4.5 se resaltan las zonas y bloques de interés del desprendimiento y de la trayectoria de bloques.

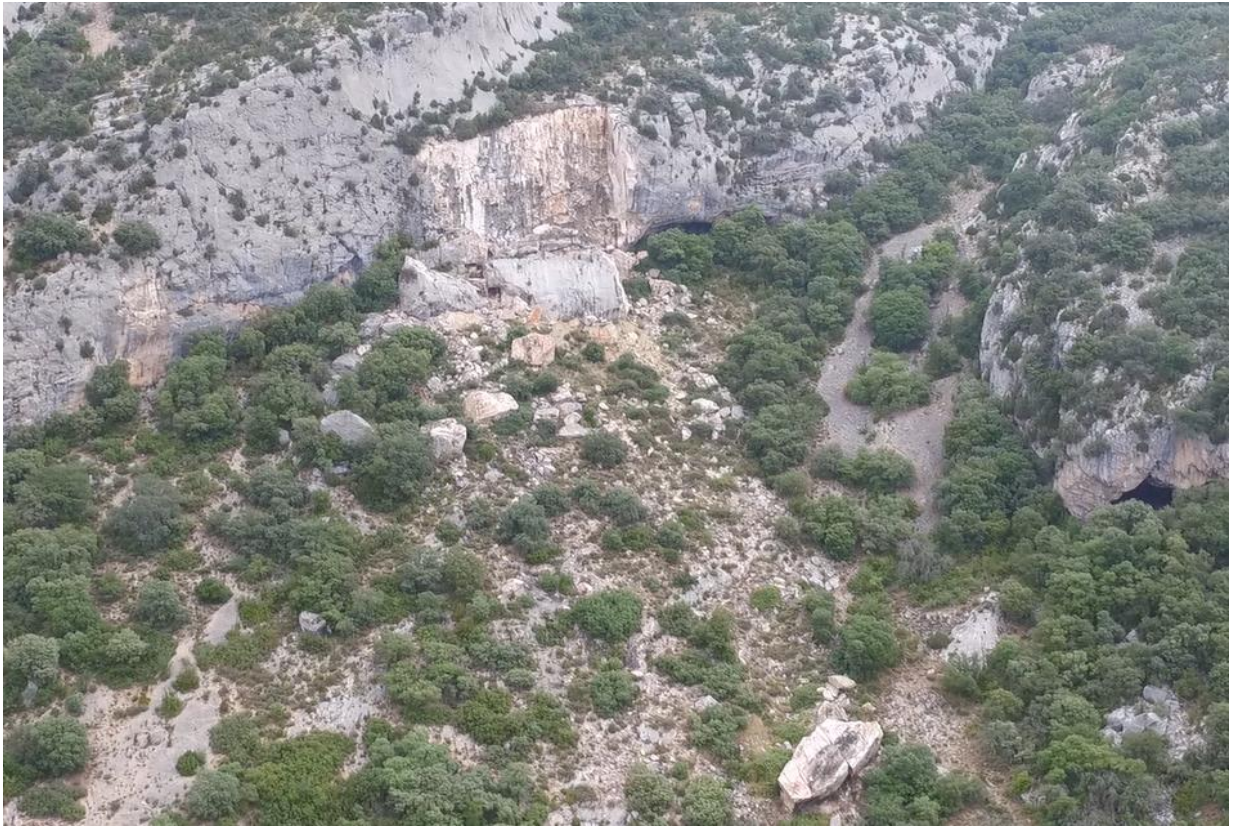


Figura 4.4. Fotografía aérea de la zona del desprendimiento, cedida por Roger Ruiz.



Figura 4.5. Fotografía aérea editada resaltando las zonas de estudio (cicatriz, depósito y bloques aislados).

Se muestran fotografías con alta resolución de la cicatriz y del depósito en la base de la pared rocosa en la figura 4.6 y figura 4.7, con el fin de apreciar con más detalle las dimensiones del desprendimiento y la fragmentación de todos los bloques de roca.



Figura 4.6. Fotografía cedida por Roger Ruiz Carulla. Fotografía aérea con dron de la cicatriz del desprendimiento.



Figura 4.7. Fotografía cedida por Roger Ruiz Carulla. Fotografía aérea con dron del depósito bajo la pared rocosa..

Con el fin de observar la situación antes y después de ocurrir este evento, gracias al software Google Earth Pro y al Instituto Cartográfico de Cataluña se obtuvieron dos

ortofotos, una del año 2005 (previa al desprendimiento) y una ortofoto actual, ilustradas en las figuras 4.8 y 4.9. Además, estas ortofotos permiten conocer si existían bloques en el talud previos al desprendimiento de roca, para poder así luego no tenerlos en cuenta a la hora de analizar la fragmentación de bloques y volumen total del desprendimiento rocoso, como se verá posteriormente en este documento.



Figura 4.8. Ortofoto a escala 1:2000 de la zona de estudio previa al desprendimiento, año 2005. (Google Earth Pro)



Figura 4.9. Ortofoto a escala 1:2000 de la zona de estudio posterior al desprendimiento, año 2017. (Instituto Cartográfico de Cataluña)

Sin embargo, como se verá en esta tesina en el apartado de medidas de fragmentos de bloques, la ortofoto actual no precisa de resolución suficiente para obtener medidas de volúmenes de bloques, por lo que se realizó, por Roger Ruiz-Carulla, una ortofoto de 2 centímetros de resolución mediante dron para trabajar con ella.

5. Análisis de fragmentación

5.1 Metodología adoptada

Como ya se ha citado, el primer objetivo de esta tesina es realizar una estimación del volumen implicado en un desprendimiento rocoso ocurrido cerca de la localidad de Isona en 2006. Para ello, se ha optado por la utilización de un dron (DJI Inspire 1 Pro, figura 5.1), dotado de cámaras de fotos de alta definición (modelo FC550), con el cual se realizan varios barridos con distintas trayectorias, con el fin de obtener un modelo 3D que defina con precisión el depósito del desprendimiento rocoso.



Figura 3. Imagen del dron DJI Inspire 1 Pro utilizado para la obtención de datos en campo.

En las figuras 5.2 y 5.3 se muestra una comparativa de las ortofotos ofrecidas por el Instituto Cartográfico de Cataluña (figura 5.2, resolución de 25cm) y las utilizadas en el presente trabajo (figura 5.3, resolución de 2cm).

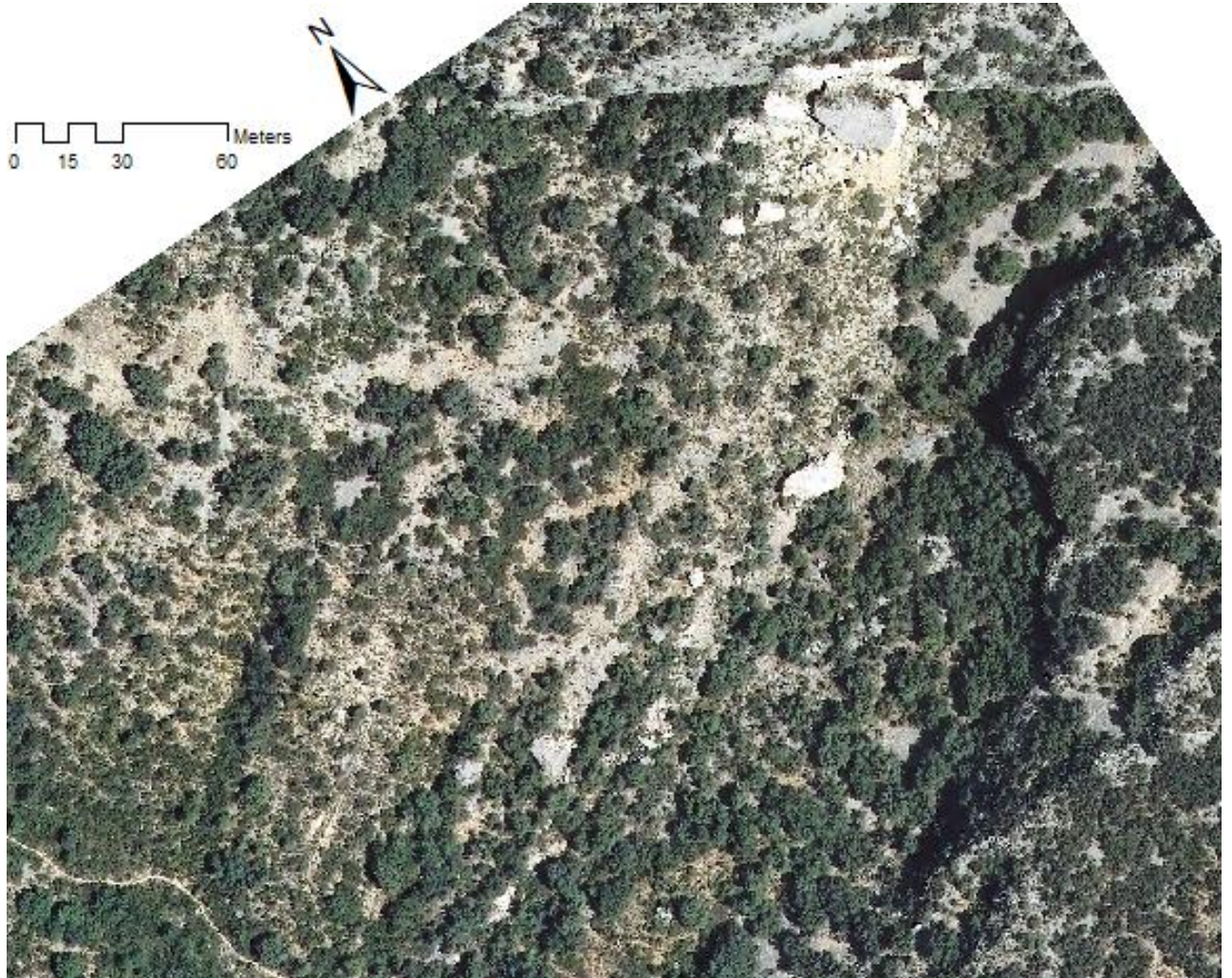


Figura 5.2. Ortofoto de la zona de estudio (Instituto Cartográfico de Cataluña). Resolución de 25cm.



Figura 5.3. Ortofoto de la zona de estudio (cedida por Ruiz-Carulla). Resolución 2cm.

Gracias a este modelo 3D y su nube de puntos correspondiente es posible caracterizar la zona de salida en la pared rocosa, pudiendo estimar un volumen inicial de salida, y también realizar una reconstrucción del volumen desprendido, realizando una caracterización del patrón de discontinuidades, lo que permite estimar la IBSD (*In Situ Block Size Distribution*), el cual es un parámetro fundamental en el estudio de la fragmentación del desprendimiento rocoso. En la figura 5.4 se muestra el modelo 3D y la nube de puntos mencionados anteriormente, desde los cuales se trabajará para obtener los resultados citados.



Figura 5.4. Modelo 3D (nube de puntos) de la zona de estudio. Visualización mediante software CloudCompare.

La caracterización del depósito y estimación de la *Rockfall Block Size Distribution* (RBSD), también se apoyan en los datos obtenidos por los vuelos de dron citados anteriormente. Sin embargo, en este caso, la estimación de la RBSD se realiza analizando las ortofotos obtenidas en dichos vuelos, por lo que se trabajará en dos dimensiones (2D) mediante el cálculo de áreas de los bloques de roca fragmentados y situados a lo largo del depósito. De cara a esta estimación de la RBSD del depósito, se ha de hacer referencia a la información, mapas y bases de datos a recoger con el fin de representar un Sistema de Información Geográfica que represente el estado, tanto actual como anterior al desprendimiento, de la zona de estudio.

En la mayoría de eventos ocurridos en la naturaleza, las distribuciones relacionadas a estos eventos siguen una distribución potencial, ya sea logarítmica o exponencial. Por lo tanto, la distribución potencial es un concepto muy importante para entender la distribución de volúmenes de bloques de roca en un desprendimiento rocoso.

La distribución potencial de volúmenes de bloques de roca de un desprendimiento rocoso puede definirse con variables como el volumen del bloque de roca (V_0), dos constantes (C y D) y un parámetro de probabilidad (P), el cual determinará la

probabilidad de que existan bloques con menor tamaño. Esta distribución potencial seguirá la Ecuación 1:

$$P(V_{\min} < V_0) = CV_0^{-D} \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta distribución potencial se utilizará en el análisis y distribución de volumen de los bloques de roca situados en el depósito (RBSD), mientras que en la IBSD no se tendrá en cuenta ya que no se trata de una medida directa (no es posible realizar esta medida, ya que el desprendimiento ya ha ocurrido) sino una estimación basada en una reconstrucción del volumen y sus discontinuidades.

5.2 Reconstrucción del volumen de salida y caracterización de la IBSD

Como ya se ha mencionado en la presente tesina, con el fin de obtener una caracterización válida de la IBSD, se opta por una reconstrucción del volumen desprendido sobre la cicatriz del desprendimiento. Esta técnica ofrece una estimación del volumen total del desprendimiento y, además, una distribución estimada de la *In Situ Block Size Distribution* (IBSD), el cual es un *input* (dato de entrada) en el modelo de fragmentación que se utiliza en este documento.

Esta reconstrucción del volumen se basa en las discontinuidades, juntas y aperturas que están presentes en el macizo rocoso, las cuales se recogen también con la fotogrametría mediante dron. Por lo tanto, gracias a los datos obtenidos en los vuelos, se pueden identificar las familias de discontinuidades, tanto en la cicatriz del desprendimiento como en los bloques desprendidos de mayor tamaño, dándose así a conocer los planos de debilidad sobre los que conceptualmente fracturará el macizo.



Figura 5.5. Reconstrucción del volumen desprendido sobre fotografía aérea.

El análisis de dichos datos se realiza con el software Rhinoceros, el cual permite la creación de un volumen base (figura 5.5) sobre el cual se efectúan diferentes cortes en base a los planos de discontinuidades, juntas y apertura existentes en el macizo rocoso. Además, el volumen reconstruido es equivalente al volumen total del desprendimiento, ya que se trata de una reconstrucción sobre la propia cicatriz de la pared rocosa. Mediante este método, los resultados ofrecen un volumen estimado de $3.691,85 \text{ m}^3$, el cual es muy similar al obtenido mediante la caracterización del depósito, como se ve a continuación en el apartado de la *Rockfall Block Size Distribution* (RBSD).

En la figura 5.6 se puede observar una primera estimación de los planos existentes y los diferentes cortes a realizar en el volumen creado desde diferentes perspectivas.

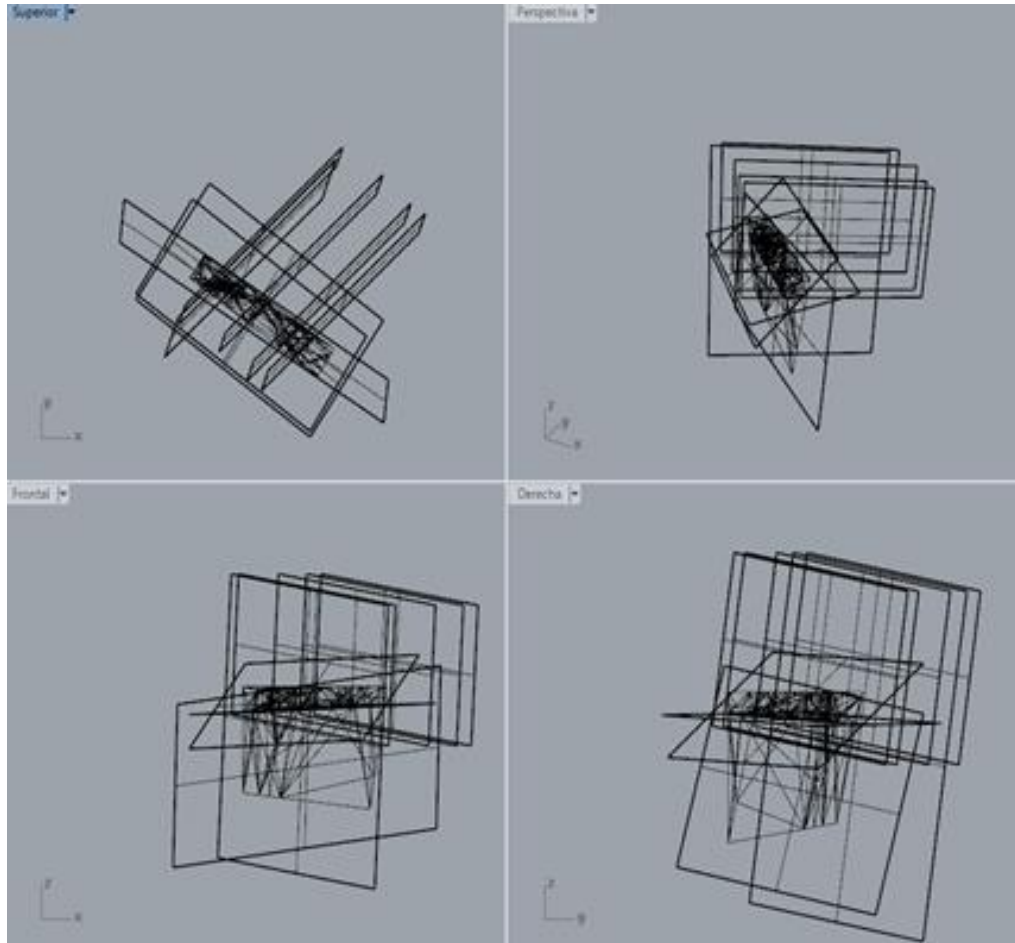


Figura 5.6. Cortado y remodelado del volumen reconstruido del desprendimiento mediante el software Rhinoceros.

Se han podido observar 3 familias de discontinuidades a partir de las imágenes obtenidas en los vuelos de dron, centrándose en la cicatriz del desprendimiento.

Una vez efectuados los análisis y comparaciones de las familias de discontinuidades y juntas en el macizo rocoso y representadas estas en el volumen reconstruido, el siguiente paso es aplicar dichos cortes para conocer la IBSD del desprendimiento. En la figura 5.7 se aplican dichos cortes, también mediante el software Rhinoceros, y se le aplica un sombreado con el fin de que la reconstrucción sea más visual.

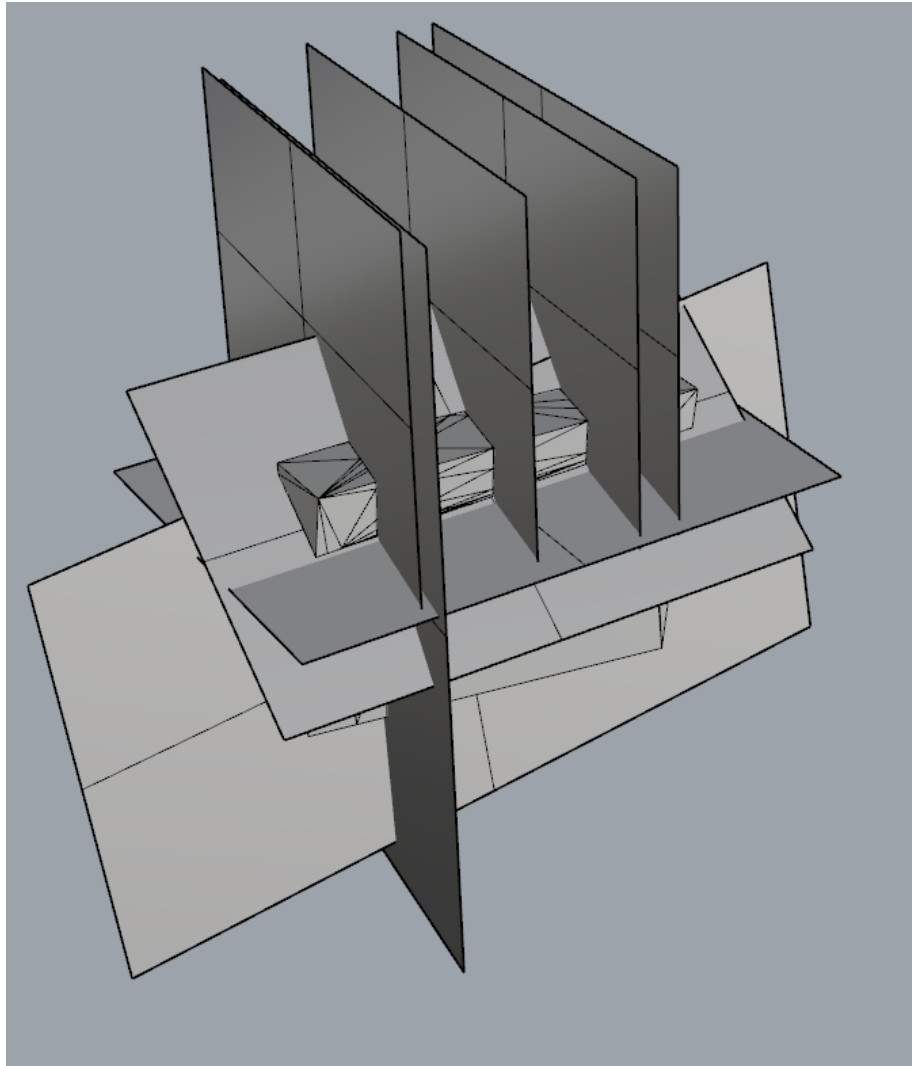


Figura 5.7. Cortes realizados sobre el volumen reconstruido del desprendimiento (Software Rhinoceros).

Por último, se presenta en la figura 5.8 el remodelado final a utilizar en la caracterización de la IBSD. Se puede observar como los planos de discontinuidades y juntas utilizados cortan el macizo rocoso en diferentes partes generando una cierta cantidad de bloques (alrededor de 30).

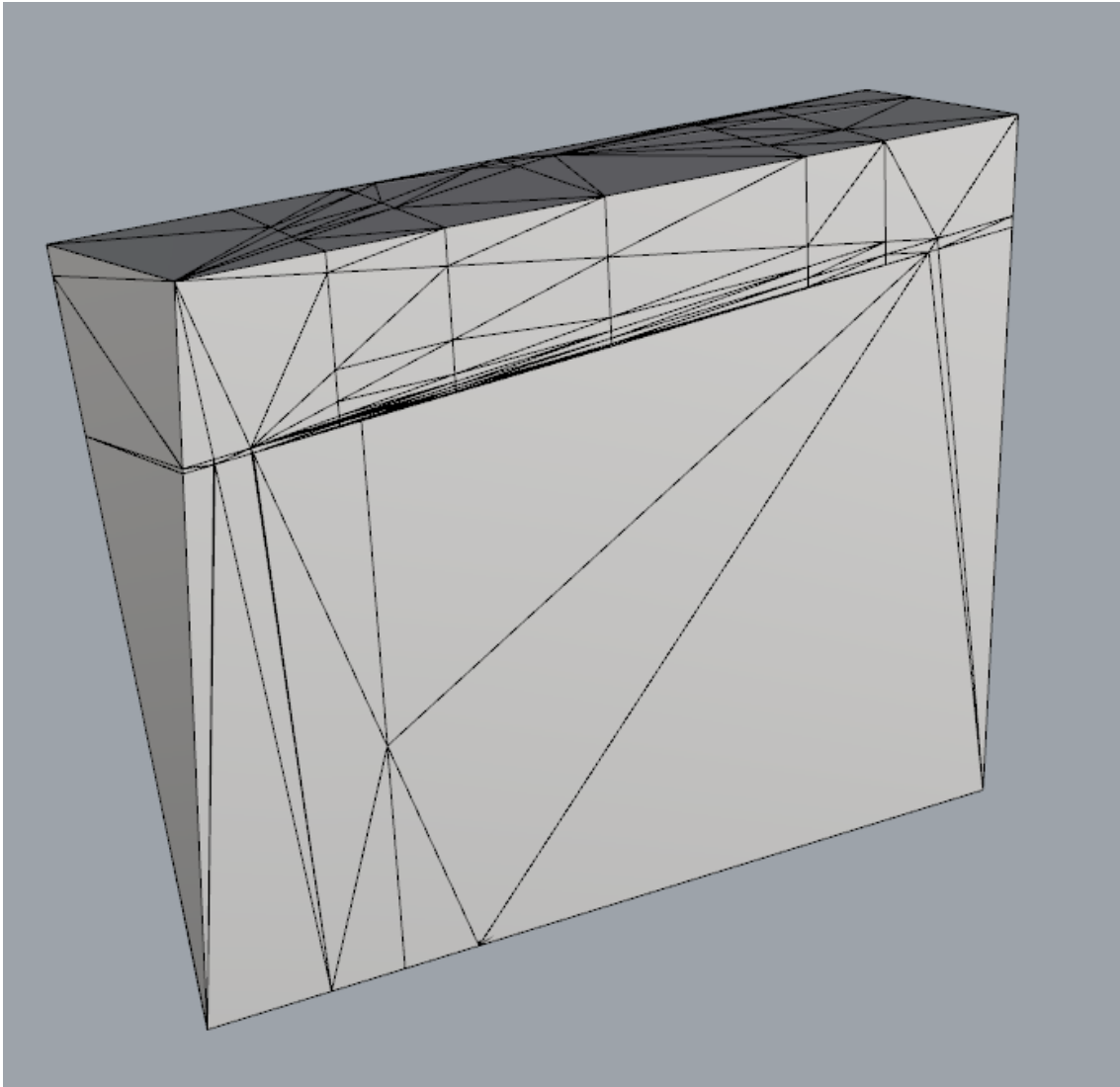


Figura 5.8. Remodelado y reconstrucción final del volumen del desprendimiento para la caracterización del IBSD (software Rhinoceros).

Cabe destacar que esta reconstrucción del volumen es una estimación, ya que se toman en cuenta todas las juntas y discontinuidades presentes en el macizo de roca, con la hipótesis de que no existe cohesión que pueda impedir la disgregación, por lo que se generarán todos los fragmentos antes de impactar con el terreno. Una mejora en este aspecto podría ser una mayor investigación y conocimiento de lo que ocurre y existe en esas juntas, lo que conllevaría en una mejora en la estimación de la IBSD. Estas mejoras se detallan en el apartado 8 del presente documento.

En la figura 5.9 se muestra la distribución de volúmenes de los bloques iniciales (IBSD), la cual se utilizará como dato de entrada en el modelo de fragmentación.

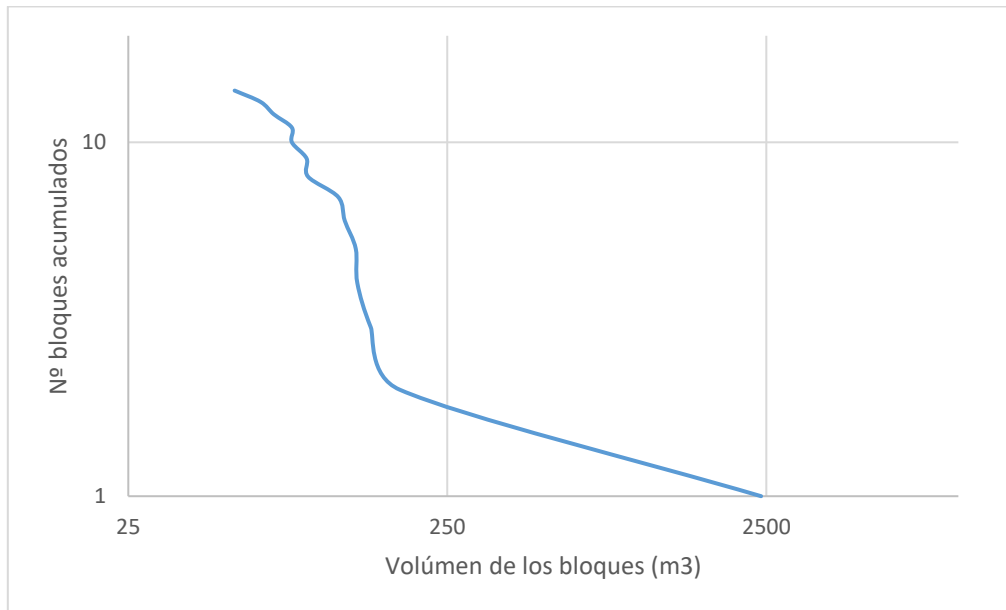


Figura 5.9. Gráfica de la distribución de volúmenes de bloques iniciales (IBSD)

5.3 Caracterización de la RBSD

5.3.1 Cartografía manual

Como ya se ha citado en apartados anteriores, para la caracterización de la RBSD se utilizan ortofotos obtenidas mediante vuelos de dron con una precisión de 2cm. Por lo tanto, el análisis del depósito se realiza solamente en 2D, por lo que es necesaria una transformación geométrica para obtener el volumen de los fragmentos de roca.

Por lo tanto, para comenzar se analiza una ortofoto previa al desprendimiento, concretamente del año 2005, conseguido gracias al software Google Earth Pro, para poder así diferenciar los bloques y/o afloramientos de roca preexistentes en la zona de estudio antes del desprendimiento, para así no tenerlos en cuenta a la hora de caracterizar la RBSD. Este paso es solo visual, ya que no habrá que medir ningún volumen de esos fragmentos previos. En la figura 5.10 se puede observar la ortofoto de la zona de estudio del año 2005, editada con el programa ArcGis, resaltando en rojo los afloramientos y rocas preexistentes.

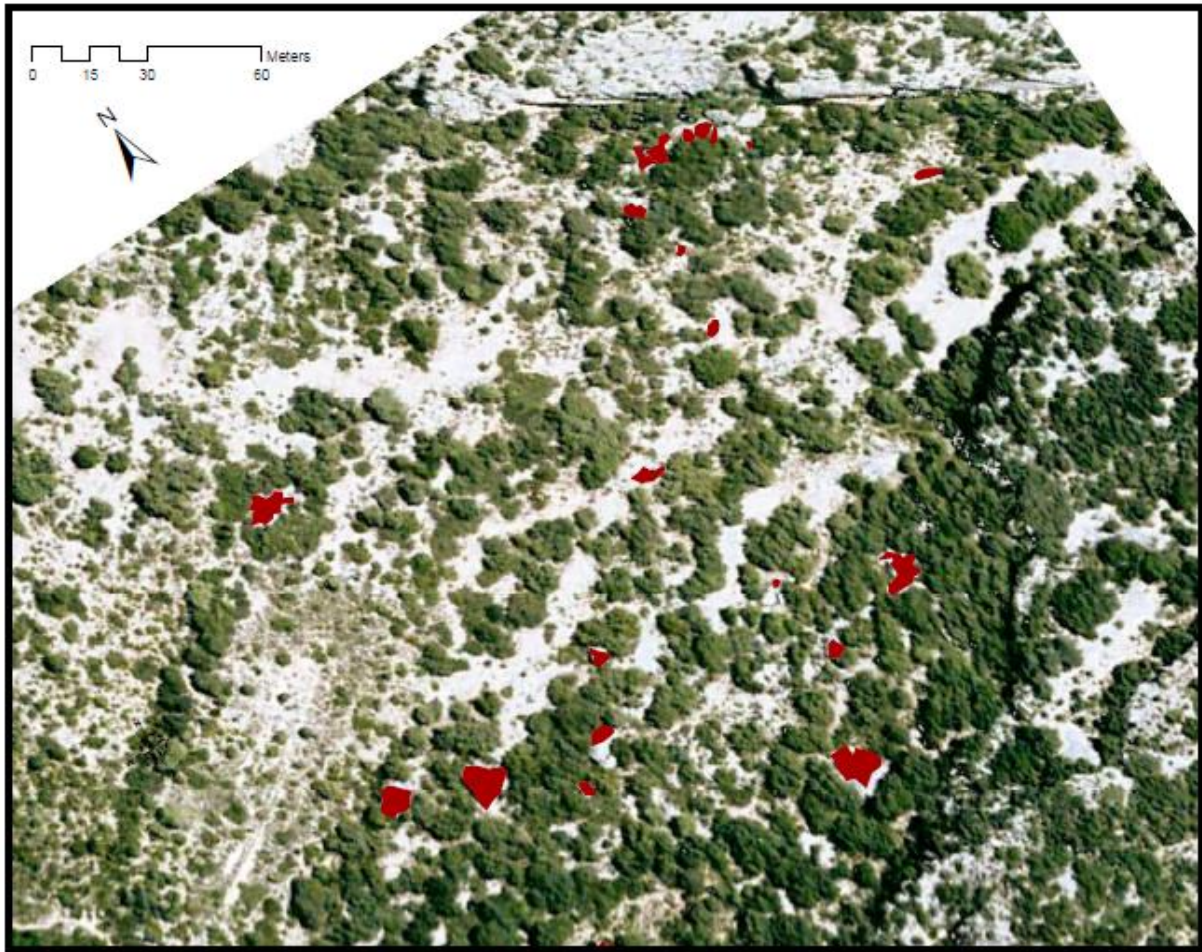


Figura 5.10. Ortofoto editada de la zona de estudio en el año 2005, previa al desprendimiento (Google Earth Pro).

Una vez realizada este paso, se solapan los bloques preexistentes en la ladera con la ortofoto actual obtenida mediante el dron, con la precisión de 2cm. Por consiguiente, con la misma técnica empleada en el software ArcGis en los bloques preexistentes, se crean polígonos de igual superficie que los que se observan en la ortofoto, identificando así los bloques de roca fragmentados en el desprendimiento. En la figura 5.11 se puede observar una vista general de la ortofoto con los bloques de roca resaltados en amarillo, mientras que en rojo permanecen las rocas preexistentes ya comentadas.

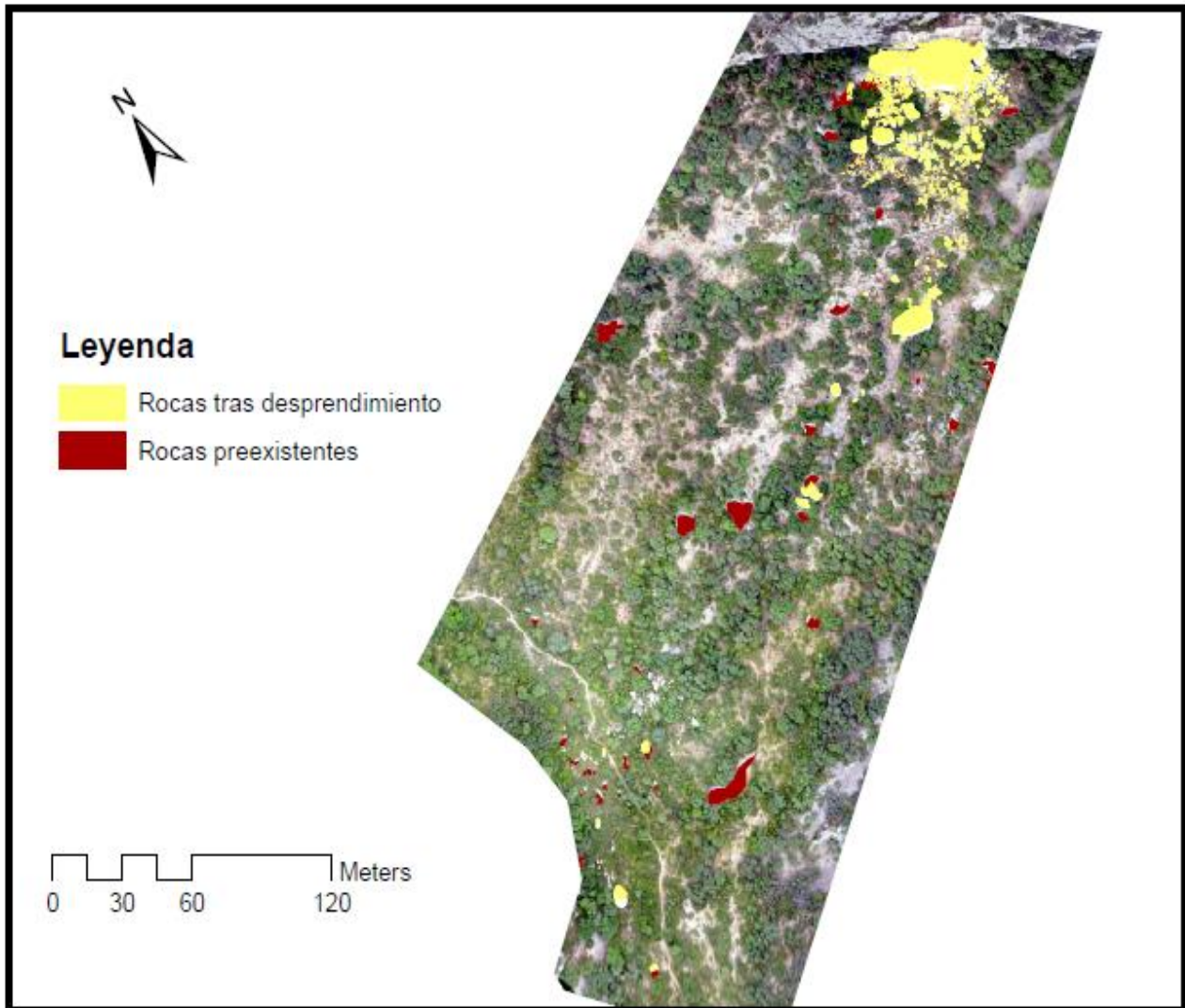


Figura 5.11. Ortofoto editada de la zona de estudio con los bloques de roca fragmentados en el desprendimiento.

A continuación, en las figuras 5.12 y 5.13 se puede observar con más detalle la zona cercana a la cicatriz del desprendimiento. En la primera imagen (figura 5.12) se muestra la ortofoto del depósito creado en la zona cercana de la pared rocosa, y en la segunda imagen (figura 5.13) los bloques de roca fragmentados, los cuales serán medidos (en áreas) para analizar el proceso de fragmentación.



Figura 5.12. Imagen en detalle del depósito del desprendimiento, resolución de 2cm. (Imagen cedida por Roger Ruiz-Carulla)

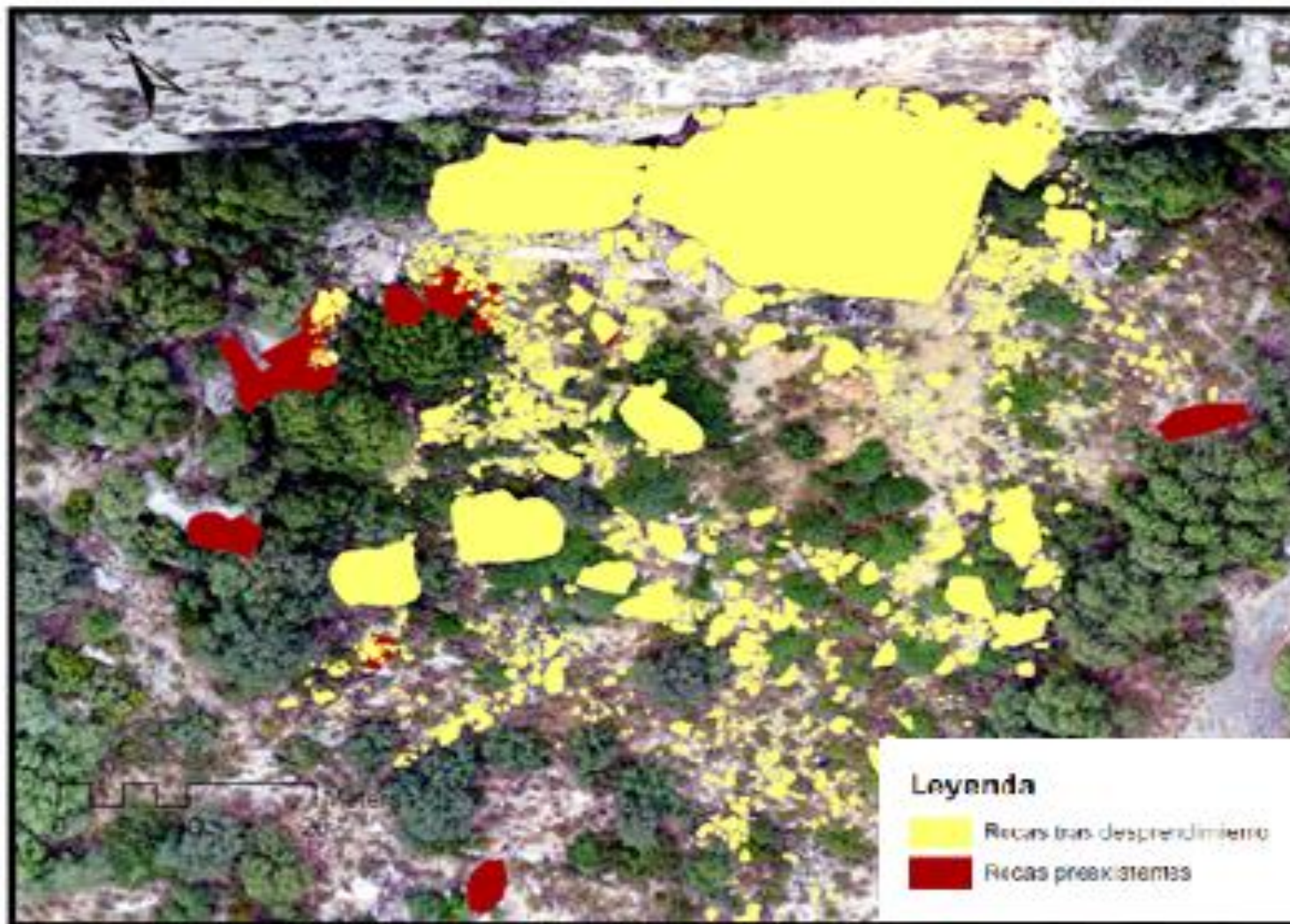


Figura 5.13. Imagen en detalle editada de las rocas a medir en el depósito cercano al desprendimiento.

En total se han medido cerca de 4.000 fragmentos de bloques de roca a lo largo de todo el depósito (exactamente 3.988). Por lo tanto, la RBSD se obtendrá a partir de la medida de las áreas de cada uno de los polígonos creados en los bloques de roca.

En la figura 5.14 se muestra el gráfico que reúne el número de fragmentos de bloques acumulados en el eje de ordenadas y el área de los mismos en el eje de abscisas, añadiéndole la ley potencial que la propia distribución sigue. Cabe destacar que, como ya se ha comentado anteriormente en la presente tesina, se sigue una distribución potencial, por lo que al implantar a los ejes una escala logarítmica, se sigue una linealidad en la gráfica. Sin embargo, con los fragmentos de roca más pequeños, se observa que tiende a perderse esa linealidad. Esa pérdida de linealidad se denomina como *rollover*, y es consecuencia de una medida insuficiente de los bloques de roca más pequeños. Normalmente, esta falta de medidas se debe a la inmensa cantidad de bloques existentes en las dimensiones más pequeñas y su gran dificultad para medirlos todos, lo que conllevaría mucho tiempo. Sin embargo, en el caso de Isona, además de este motivo, este fenómeno se debe también a la resolución de la ortofoto, de 2cm, por lo que los fragmentos con dimensiones inferiores a esos 2cm son prácticamente imposibles de medir, ya que no son visibles.

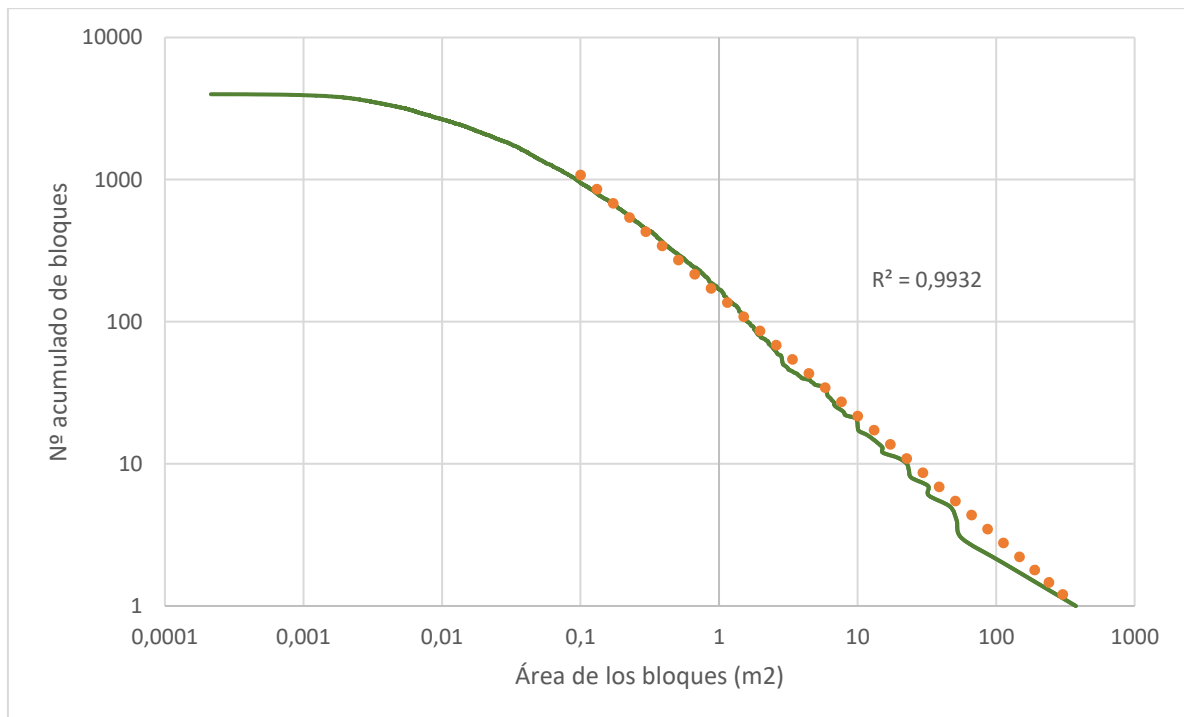


Figura 5.14. Gráfico de la distribución de áreas de los fragmentos de bloques de roca en el desprendimiento de Isona.

Como comparativa, en las figuras 5.15 y 5.16 se muestran las rocas medidas en la ortofoto ofrecida por el Instituto Cartográfico de Cataluña. Dada la resolución de la ortofoto (25cm), solamente se pueden llegar a medir 208 bloques. La distribución de bloques obtenida sigue también una ley potencial, por lo que es una distribución válida en ese sentido. Sin embargo, la poca cantidad de bloques en la distribución es una limitación clara, ya que, como se ha analizado, se han medido cerca de 4.000. Estos datos no serían unos datos de entrada óptimos en el modelo, por lo que se utilizarán los datos de la ortofoto de 2cm de resolución, obtenida mediante fotogrametría.

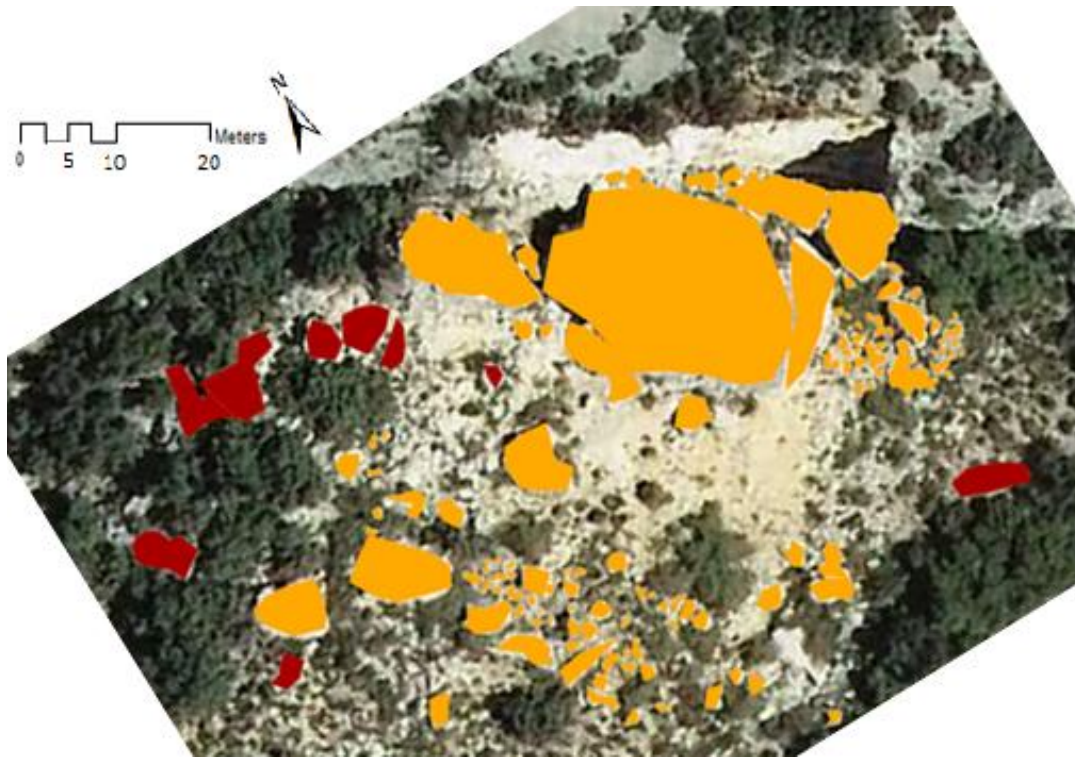


Figura 5.15. Rocas medidas en el depósito. Ortofoto de 25cm de resolución ofrecida por el Instituto Cartográfico de Calatunya.

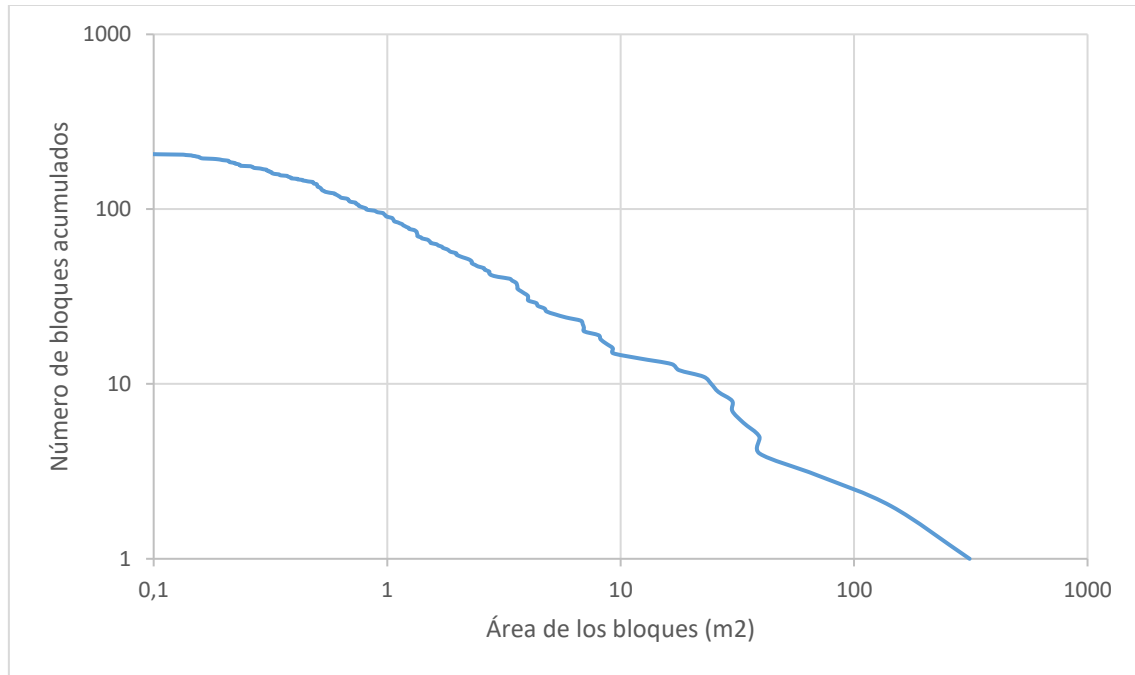


Figura 5.16. Gráfico de la distribución de áreas de los fragmentos de bloques de roca en el desprendimiento de Isona medidas en ortofoto ofrecida por el Instituto Cartográfico de Cataluña.

El próximo paso trata de realizar una transformación geométrica para estimar los volúmenes de los bloques de roca medidos, por lo que habrá que aproximar las áreas medidas en 2D a figuras en 3D. Las figuras utilizadas deben ser simples, para no complicar el análisis. Por lo tanto, la figura geométrica a utilizar es una esfera inscrita en un cubo (figura 5.17) cuyas caras serán equivalentes a las áreas de los bloques medidos.

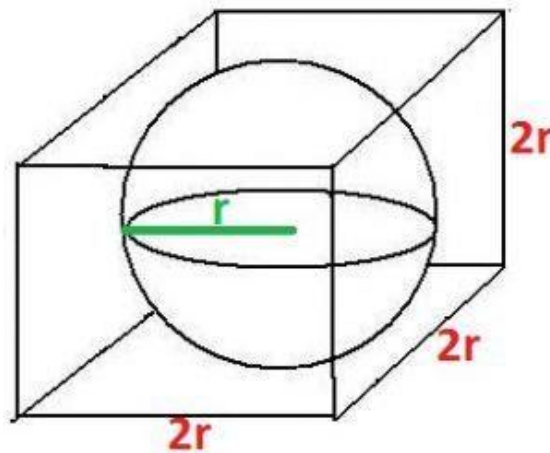


Figura 5.17. Esfera inscrita a un cubo, figura utilizada para estimar el volumen de los fragmentos de roca.

Es decir, se calculará la longitud de las aristas (L) de dicho cubo (Ecuación 2) y el radio de la esfera (R) será la mitad de esas aristas (Ecuación 3). Finalmente, se calculará por geometría el volumen (V) de la esfera (Ecuación 4). Así se obtendrá el volumen aproximado de cada uno de los fragmentos de bloques de roca del desprendimiento.

$$L = \sqrt{\text{Área de los bloques}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$R = \frac{L}{2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \text{Ecuación 4}$$

Se debe resaltar que se opta por la esfera inscrita en un cubo como aproximación de los fragmentos del desprendimiento debido a que el volumen total del desprendimiento es el que más se aproxima al volumen total calculado en la reconstrucción y modelado del volumen inicial. Al utilizar cubos o esferas circunscritas, el volumen no se aproxima al ofrecido por la IBSD.

En la tabla 1 se muestra un resumen de esa distribución de bloques de roca realizando una división de diferentes compartimentos (*bins*) de volumen de los fragmentos. Se observa que la cantidad de bloques medidos asciende a 3988, como ya se mencionaba anteriormente.

Tabla 1. Volúmenes de los fragmentos de roca medidos en el depósito del desprendimiento de Isona separados por compartimentos.

	Vol > than (m3)	Nº Bloques	Nº Bloques acumulados
CLASE 1	0,000001	28	3988
CLASE 2	0,00001	203	3960
CLASE 3	0,00005	268	3757
CLASE 4	0,0001	807	3489
CLASE 5	0,0005	354	2682
CLASE 6	0,001	847	2328
CLASE 7	0,005	316	1481
CLASE 8	0,01	284	1165
CLASE 9	0,02	296	881
CLASE 10	0,05	163	585
CLASE 11	0,1	134	422
CLASE 12	0,2	115	288
CLASE 13	0,5	70	173
CLASE 14	1	37	103
CLASE 15	2	27	66
CLASE 16	5	15	39
CLASE 17	10	8	24
CLASE 18	20	6	16
CLASE 19	50	5	10
CLASE 20	100	2	5
CLASE 21	200	2	3
CLASE 22	500	0	1
CLASE 23	1000	1	1

Sin embargo, se ha de resaltar que la caracterización del depósito o de la RBSD es una estimación, la cual se podría calibrar con medidas realizadas *in situ* (mediante cinta) en la zona de estudio con el fin de obtener resultados contrastados y más fiables. Esto podría ser una mejora para futuros estudios, aunque, como se verá a continuación, en la presente tesina se han tomado correcciones para paliar esta falta de calibración.

5.3.2 Correcciones cartografía manual sobre modelo 3D

Sin embargo, la estimación de los volúmenes de los bloques de roca realizados mediante una transformación de la ortofoto en 2D y su respectiva estimación de cambio de áreas a volúmenes se sigue alejando del volumen total estimado en la IBSD. Por lo tanto, procediendo a analizar la distribución de volúmenes obtenida en la RBSD, se puede observar que las dimensiones de los dos bloques más grandes son los que condicionan el volumen total del desprendimiento. Como se recoge en los resultados de la RBSD con medida en la ortofoto con 2 centímetros de precisión, los dos bloques más grandes son exactamente de 3823m^3 y 631m^3 , con los cuales ya se supera el volumen del IBSD calculado mediante la reconstrucción del volumen desprendido, visto en apartados anteriores. Es por eso que se pretende realizar una corrección para estos dos bloques de roca, la cual consistirá en una medida manual de dichos bloques directamente en el modelo 3D (nube de puntos) obtenido por los vuelos de dron (facilitado por Ruiz-Carulla).

Por lo tanto, en la figura 5.18 se muestra las medidas realizadas en el modelo 3D gracias al software CloudCompare.

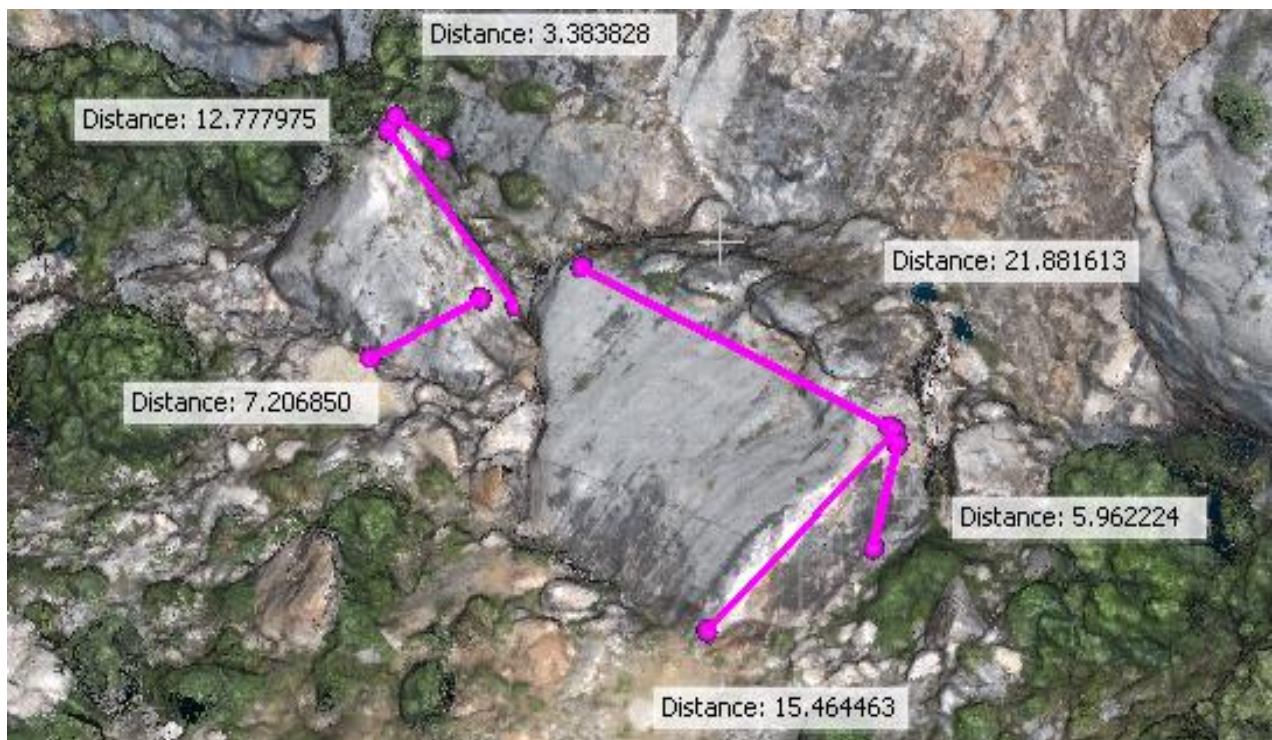


Figura 5.18. Estimación mediante el software Cloud Compare del volumen de los dos bloques más grandes en la nube de puntos.

Se observa que las medidas aproximadas realizadas para los dos bloques más grandes en la nube de puntos son muy inferiores a las obtenidas mediante la transformación de áreas a volúmenes. En este caso, los bloques de mayor tamaño tienen un volumen alrededor de 1.800m^3 y 300m^3 . Por lo tanto, se utilizará esta corrección con el objetivo de la estimación de volúmenes sea lo más precisa posible. Finalmente, con dicha corrección aplicada, se obtiene un volumen total del desprendimiento de 3.727m^3 , ya comparable al obtenido en la reconstrucción de la IBSD. Esta será pues la RBSD corregida a utilizar en el presente trabajo para la calibración del modelo de fragmentación.

5.4 Modelo de fragmentación RFFM

En la presente tesina se utiliza un modelo de fragmentación en el cual el macizo desprendido de la pared rocosa comienza con una disgregación en base a las discontinuidades existentes en el mismo, dándose después la fractura de dichos bloques en base a impactos producidos con el terreno. Esto genera nuevos bloques de menor tamaño que siguen fragmentándose a medida que avanzan por el talud. Por lo tanto, como ya se ha comentado, el primer paso en la fragmentación del desprendimiento es la disgregación, delimitada por el patrón de discontinuidades, la cual se recoge en la IBSD.

El modelo de fragmentación utilizado se basa al modelo genérico desarrollado por Perfect (1997), el cual supone una distribución fractal de la fragmentación. Por lo tanto, el Rockfall Fractal Fragmentation Model (RFFM) (Ruiz-Carulla et al., 2017) que se propone para el desprendimiento de Isona utiliza como iniciador del desprendimiento el conjunto de bloques de roca recogidos en la IBSD, que con las energías sufridas durante los impactos a lo largo de la trayectoria, los bloques, o un porcentaje de ellos, se fragmentan. Cada bloque produce pues una nueva distribución de fragmentos, generando una Rockfall Block Size Distribution (RBSD).

Mandelbrot (1982) afirmaba que los modelos fractales se comportan de manera jerárquica en base a sistemas geométricos con una escala relativamente simple. La distribución de tamaños en un sistema fractal sigue la Ecuación 5.

$$N(1/b^i) = k[1/b^i]^{-D_f} ; i = 0,1,2, \dots \infty$$

Ecuación 5

$N(1/b^i)$ representa el número total de fragmentos en cada nivel de jerarquía i , b es un factor escalar (>1) el cual define la relación entre el volumen del bloque inicial y el volumen de los fragmentos generados y D es la dimensión fractal.

Por lo tanto, el modelo fractal presentado para el caso de Isona sigue este sistema, y utiliza 3 parámetros para simular la fragmentación (Ruiz-Carulla et al., 2017).

El primer factor es la probabilidad de rotura o razón de rotura, el cual representa el porcentaje de volumen de bloque que rompe en el proceso, que tiene un rango de entre 0 y 1. Estos valores representan un bloque intacto (próximo a 0) y una rotura completa del bloque (próximo a 1). Este parámetro se define en base a la Ecuación 6.

$$P(1/b^i) = n_i/b^3$$

Ecuación 6

Donde n es el número de fragmentos generados en el nivel de jerarquía i y b es el factor escalar (el cual también es un parámetro del modelo).

El segundo parámetro es el factor de escala b ya comentado, el cual define la probabilidad de fallo, ya que ambos parámetros son dependientes entre sí. En la figura 5.19 se muestra un ejemplo de la dependencia de dichos parámetros, estableciendo un factor de escala b para la rotura de un bloque cúbico, con lo que se le asigna también una probabilidad de rotura $P(1/b^i)$.

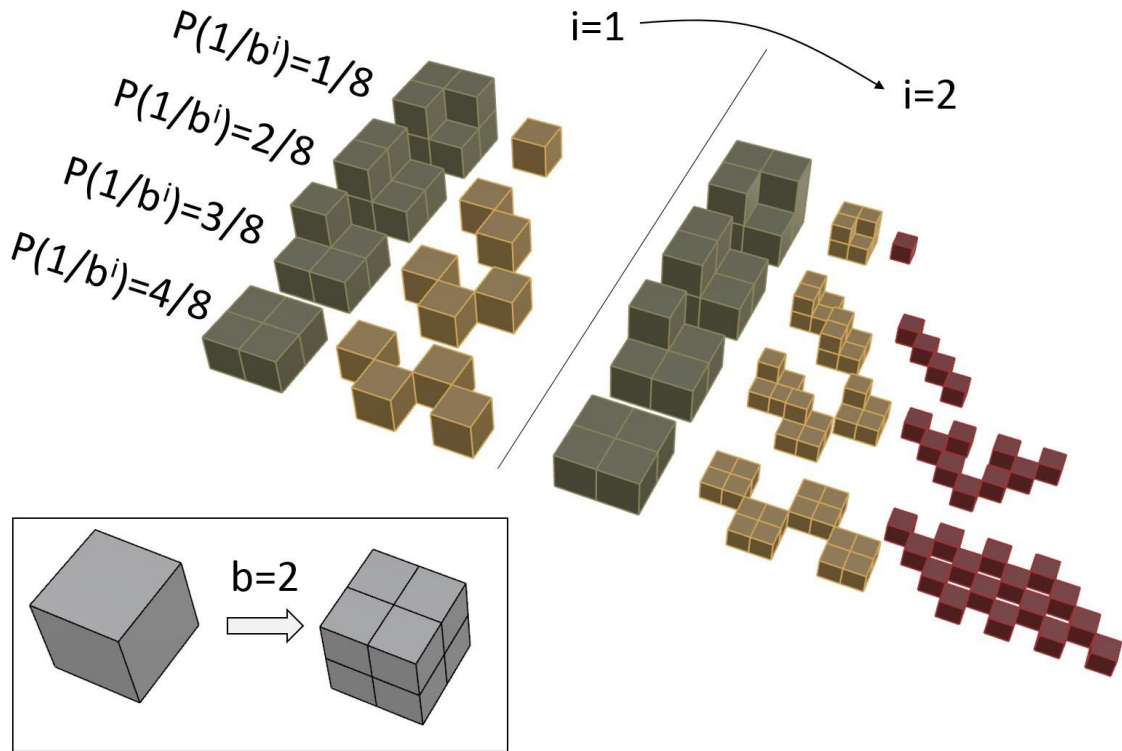


Figura 5.19. Probabilidad de rotura ($P(1/b^i)$) y factor de escala (b) en el proceso de fragmentación. (R. Ruiz 2016).

Estos dos parámetros definen la dimensión fractal D de la fragmentación siguiendo la Ecuación 7. Por lo tanto, estos dos parámetros son vitales a la hora de establecer y calibrar el modelo de fragmentación, ya que son los que marcan la magnitud en la que se fragmentan los bloques desprendidos.

$$D_f = 3 + \frac{\log[P(1/b^i)]}{\log[b]}$$

Ecuación 7

En caso más simple de un modelo fractal de fragmentación se da cuando este es invariante a la escala, ya que los parámetros a calibrar son la probabilidad de rotura y el factor de escala solamente.

Sin embargo, ocurre que en un desprendimiento no todos los bloques desprendidos rompen a la hora de impactar con el terreno. Por lo tanto, el tercer parámetro trata de simular este fenómeno, el índice de supervivencia (S_r). Este último parámetro define la proporción de bloques que permanece intacto, teniendo un rango también de entre 0 y 1. Con un valor de 0 la totalidad de los bloques que se desprenden se fragmentarán, por lo que ninguno permanecerá con su volumen inicial. El valor de 1 implica que todos los

bloques desprendidos permanecerán intactos, por lo que no ocurrirá el fenómeno de fragmentación.

En la figura 5.20 se presenta un ejemplo de un caso de fragmentación con un valor del índice de supervivencia del 33% (0,33), por lo que el 66% de los bloques desprendidos se fragmentan en cada orden de jerarquía, en base a un factor de escala (b) de 2.

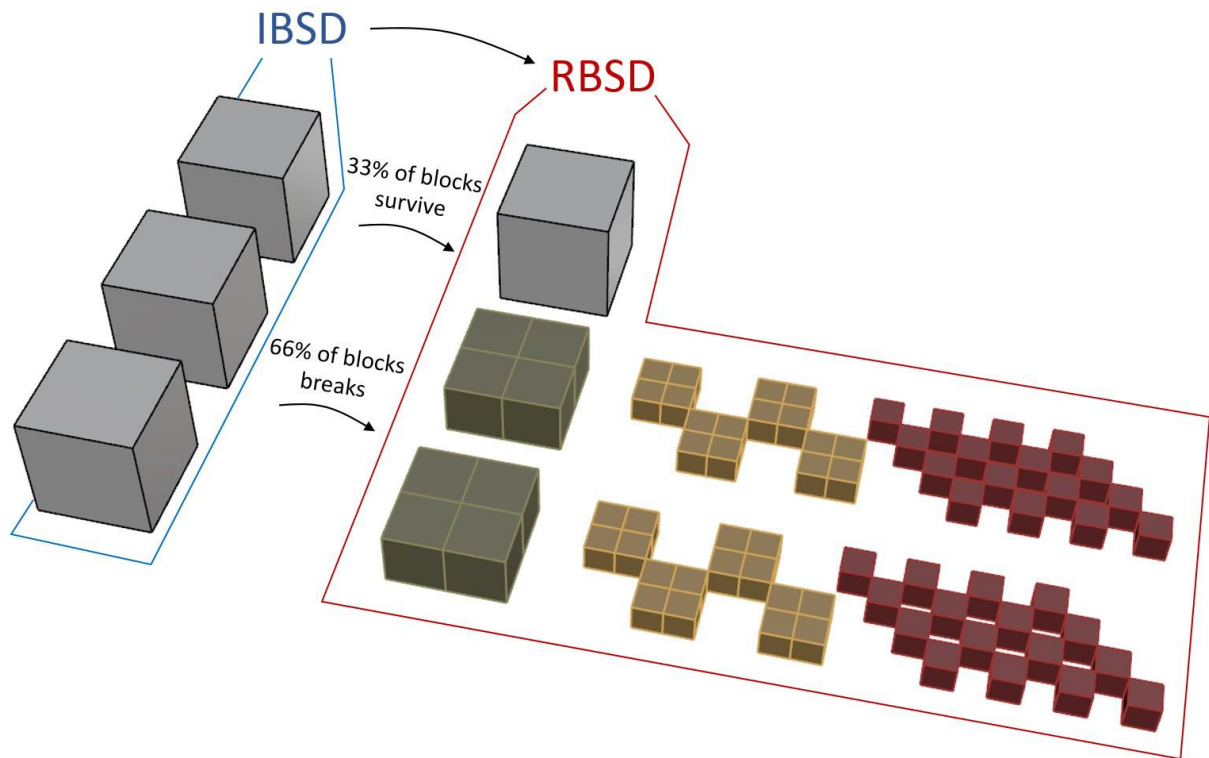


Figura 5.20. Proceso de fragmentación con un ratio de supervivencia ($S_r=0,33$) y un factor de escala ($b=2$). (R. Ruiz 2016).

En el caso de modelos variantes a la escala, Mandelbrot et al (1982) propuso una distribución hiperbólica de la probabilidad de rotura $P(1/b^i)$ (Ecuación 8).

$$P(1/b^i) = 1 - q[b^i]^r \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde q es la probabilidad de supervivencia como iniciador en base al parámetro r que determina la dependencia a la escala. Por lo tanto, la dimensión fractal seguirá la Ecuación 9.

$$D_f = 3 + \log[b^r - q(b^i)^r] / \log(b) \quad \text{Ecuación 9}$$

En resumen, se trata de calibrar el modelo en base a estos 3 parámetros con el fin de simular el proceso de fragmentación en el desprendimiento de Isona. El objetivo es aplicar el modelo a la IBSD obtenida en la reconstrucción del volumen y obtener una RBSD del modelo (que se denominará RBSD-RFFM) que se asemeje lo máximo posible a la RBSD obtenida anteriormente con la caracterización del depósito por fotogrametría.

El modelo se aplica mediante dos métodos. El primero de ellos se basa en dividir la IBSD en diferentes compartimentos (*bins*), las cuales abarcan un rango de volúmenes. Como ya se ha comentado anteriormente, es de interés realizar un análisis logarítmico en fenómenos en los que se sigue una distribución fractal, por lo que los rangos no siguen una distribución lineal, sino logarítmica. La división de compartimentos a utilizar es la recogida en el apartado 5.3 de la reconstrucción del volumen (Tabla 1) y el modelo se calibra con el software Excel. Además, al asignarle un valor fijo al parámetro probabilidad de rotura (P), se asume el proceso invariante a la escala, como demostró Turcotte en 1986 (véase apartado 2.2, figura 2.4), por lo que se mantiene constante para cada una de las distribuciones de bloques creadas a partir de la IBSD.

El segundo método es más complejo, por lo que se utiliza el software Matlab. Se trata de no realizar esa división por compartimentos, sino que se utilizan los volúmenes de cada uno de los fragmentos medidos en la IBSD. Esto facilita una comparación de resultados entre ambos métodos, y permite valorar si el análisis individual de cada fragmento generado tiene como resultado una mejora considerable en la simulación, o, por otro lado, si el análisis por compartimentos es suficiente.

5.4.1 RFFM por clases en software Excel

Al aplicar el modelo en el software Excel siguiendo la distribución logarítmica por clases en base al volumen de los bloques, se obtiene una combinación de los 3 parámetros que calibran el modelo, ajustando el RFFM a la RBSD medida en las ortofotos.

La combinación de valores de los parámetros es la siguiente:

Tabla 2. Parámetros que ajustan el modelo en el software Excel.

Parámetros del Modelo		
Factor de Escala	b	4,65
Probabilidad de Rotura	P(1/bi)	0,12
Índice de Supervivencia	Sr	0,67

El valor de la dimensión fractal debido a estos parámetros es de 1,62. Se consigue un error cuadrático del valor 0,44, lo que a priori debería ser una calibración aceptable, aunque como se ve a continuación, existe una subestimación en la fragmentación, ya que el número total de fragmentos que se obtienen en el RFFM (exactamente de 958) es muy inferior al medido en el depósito (3988). Por lo tanto, aunque el error cuadrático del modelo respecto a los datos no sea muy grande, esta carencia de simulación de los bloques más pequeños no es admisible, debido a la gran diferencia existente.

En la figura 5.21 se grafica los resultados del modelo en base a las distribuciones de volúmenes de bloques, comparando la IBSD y RBSD utilizadas como dato con la distribución ofrecida por el modelo RFFM.

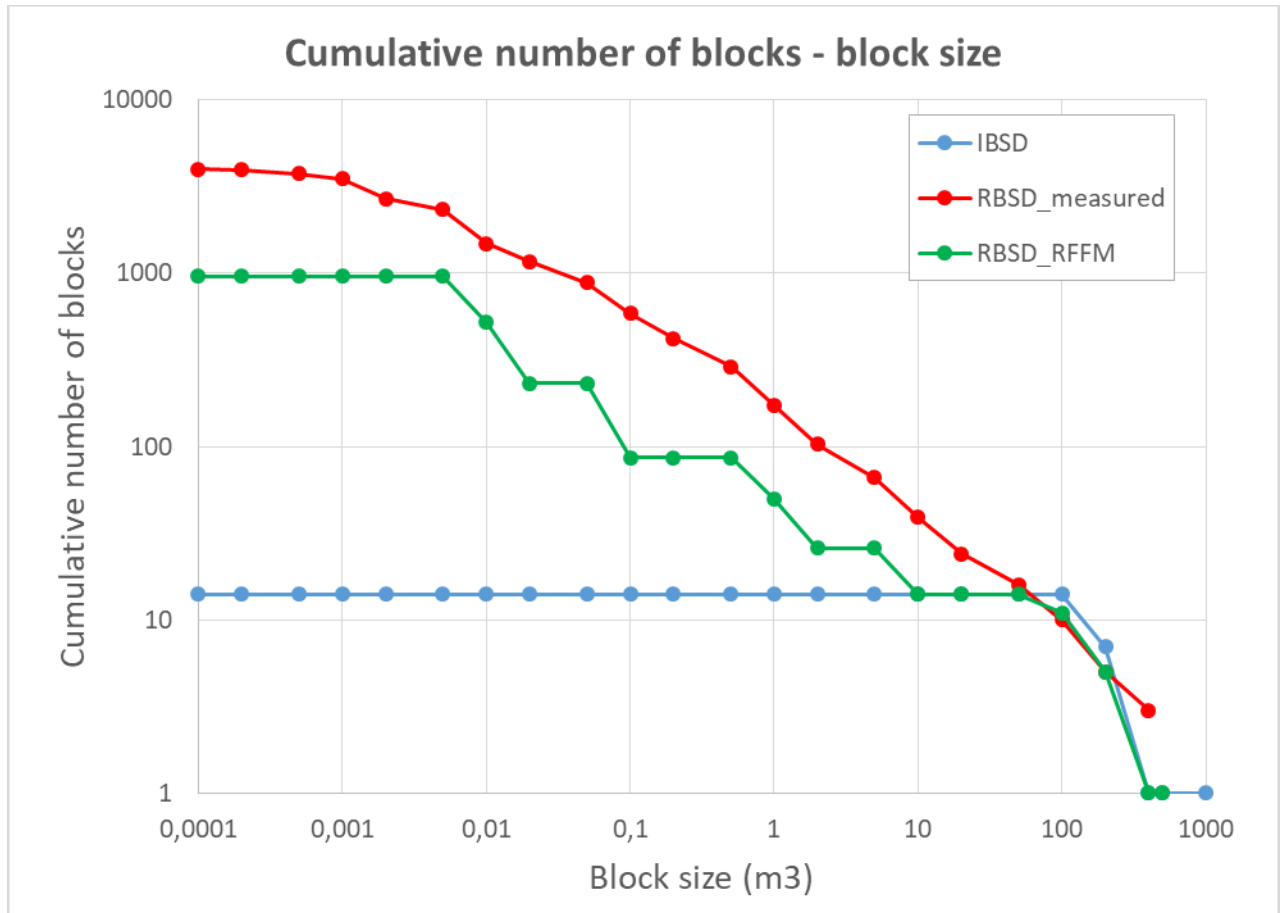


Figura 5.21. Gráfica de la distribución de volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo RFFM de ROCKRISK. ($P=0,12$, $b=4,65$, $Sr=0,67$)

A pesar de las deficiencias mencionadas, para los bloques de menor tamaño el modelo se ajusta con mayor precisión. Esto puede observarse al analizar la frecuencia relativa de los tamaños de bloques (figura 5.22).

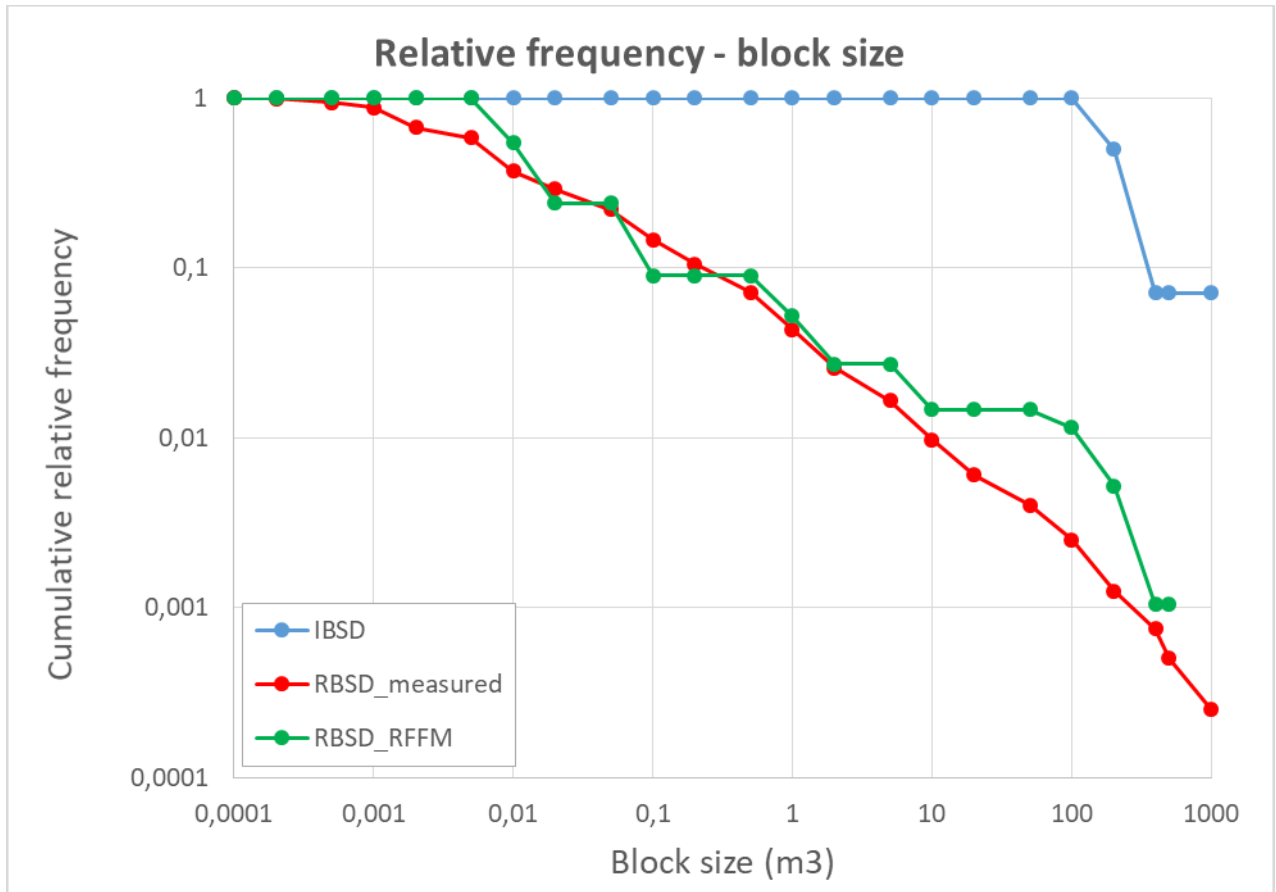


Figura 5.22. Gráfica de la frecuencia relativa acumulada de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo RFFM de ROCKRISK. ($P=0,12$, $b=4,65$, $S_r=0,67$)

La subestimación de la cantidad de bloques total en el desprendimiento debería poder paliarse aumentando en valor de la probabilidad de fallo (que tiene un valor muy bajo de 0,19) y disminuyendo el índice de supervivencia (valor de 0,67). Sin embargo, si se llevara a cabo este ajuste, el volumen de los fragmentos de roca más grandes se disminuye, lo que conlleva a un aumento considerable del error cuadrático. Dicho de otro modo, se pierde el ajuste preciso que se consigue en la distribución de los bloques más grandes, no consiguiendo además una mejora suficiente que se aproxime a la RBSD. En la figura 5.23 se muestra un ejemplo de este caso, analizando las frecuencias relativas acumuladas de los volúmenes de fragmentos, con unos valores de los parámetros del modelo de: $P=0,4$, $b=3,5$ y $S_r=0,55$ (se obtiene un error cuadrático de 2,18). Se observa claramente que la distribución de volúmenes se concentra en tamaños más grandes que en la RBSD.

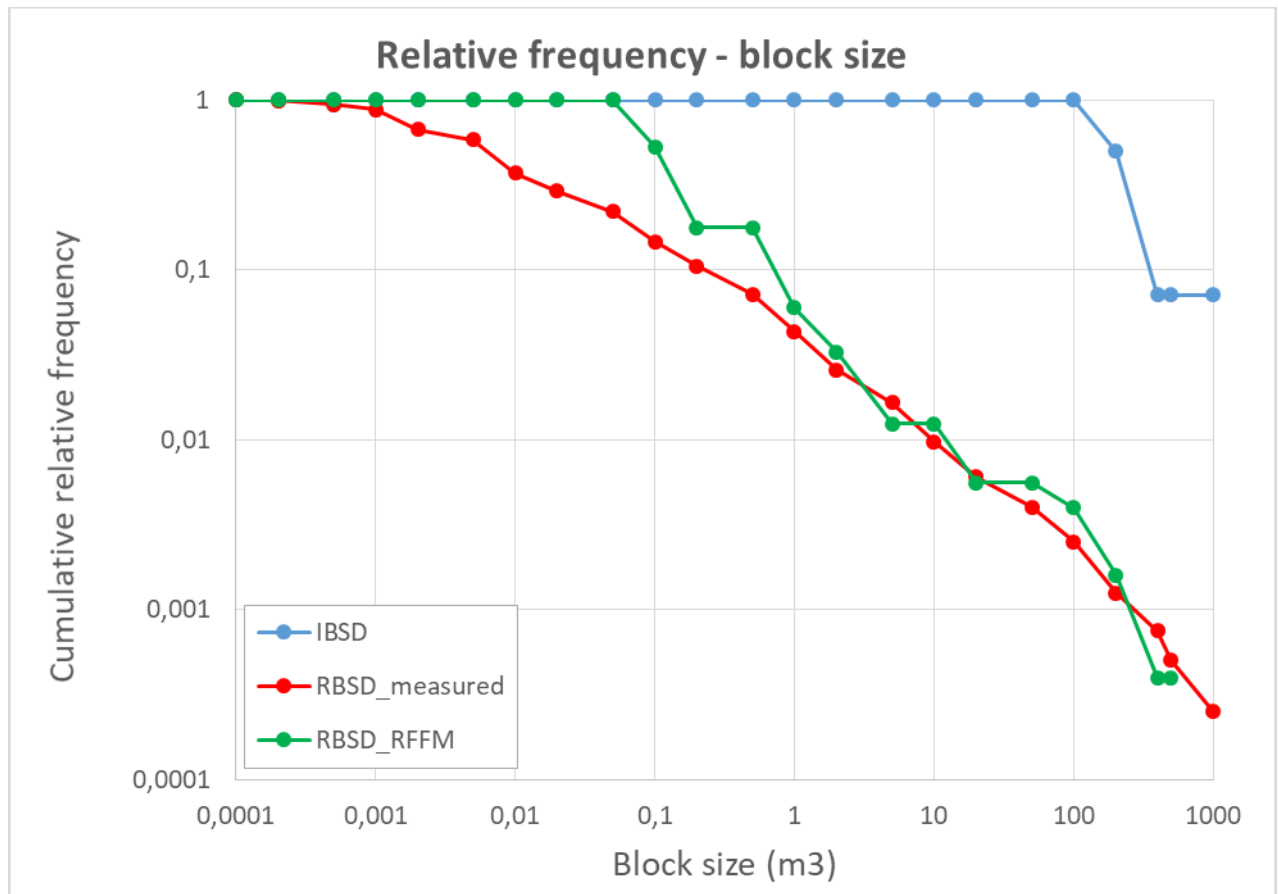


Figura 5.23. Gráfica de la frecuencia relativa acumulada de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo RFFM de ROCKRISK. ($P=0,4$, $b=3,5$, $Sr=0,55$)

5.4.2 RFFM en software Matlab

Se observa que el modelo en Excel no es óptimo y no simula el depósito del desprendimiento con gran precisión. Esto se debe, como ya se ha explicado anteriormente en la presente tesina, a que se realiza una media aritmética de los volúmenes de bloques de roca al agruparlos por compartimentos y no al analizarlos de manera individual. Por ello, como no se tiene la conservación de masa, se procede a analizar el modelo no teniendo en cuenta esa distribución logarítmica por clases de los volúmenes de bloques, lo que lo hace mucho más complejo, mediante el software Matlab.

Inicialmente se opta por la hipótesis de que el modelo es de escala invariante, por lo que se tiene un valor de la probabilidad de fallo constante durante todo el proceso de fragmentación, tal y como ocurre en el modelo simulado por Excel.

Como resultado, partiendo de los datos de la IBSD y calibrando el modelo para ajustarlo a la RBSD medida, se obtienen unos parámetros algo similares a los obtenidos en Excel, aunque con una mejora en el error cuadrático, esta vez de 0,31. Los valores de parámetros que más ajustan el modelo son los siguientes:

Tabla 3. Parámetros que ajustan el modelo invariante a la escala en el software Matlab.

Parámetros del Modelo		
Factor de Escala	b	3,4
Probabilidad de Rotura	P(1/bi)	0,31
Índice de Supervivencia	Sr	0,73

A pesar de que el modelo calibrado reduce el error entre la medida real y los resultados, al tomar cada bloque de la IBSD como individual y no agrupándolos, la imprecisión que se daba en los bloques más pequeños se agrava, ya que el bloque de menor tamaño simulado es de $0,06\text{m}^3$ (similar al obtenido en la calibración mediante Excel), mientras que en la RBSD se medían bloques del orden de 10^{-5}m^3 . En la figura 5.24 se grafica las frecuencias relativas de tamaños de bloques (tal y como se analiza en el modelo Excel), y se puede observar como este modelo es aún menos preciso en los bloques más pequeños, por lo que no se puede garantizar su validez a la hora de simular el proceso de fragmentación.

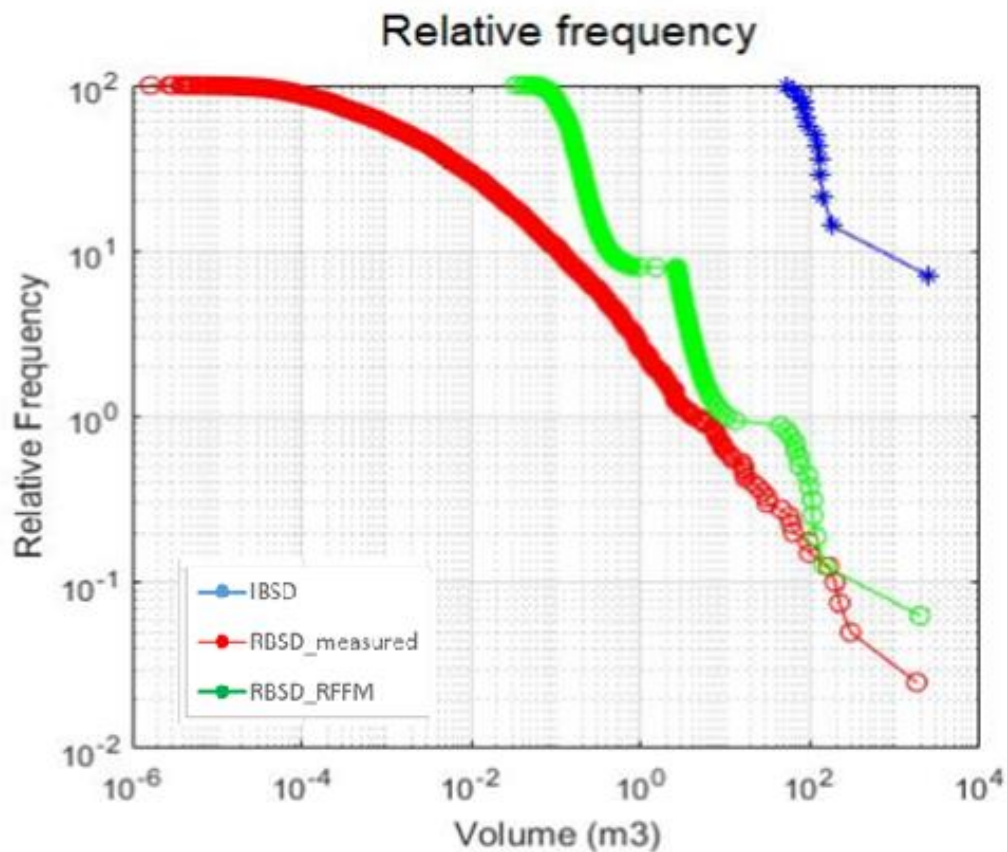


Figura 5.24. Gráfica de frecuencia relativa de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo en Matlab. ($P=0,31$, $b=3,4$, $Sr=0,73$).

5.4.3 RFFM variante a la escala en software Matlab

En conclusión, la hipótesis de asumir un modelo de escala invariante para este desprendimiento no es válida, en base a los resultados obtenidos en los dos modelos anteriores. Por lo tanto, se debe obtener un modelo de escala variante en el que se intenten mejorar los resultados obtenidos con anterioridad. Este modelo variante con la escala afecta a la estimación del parámetro Probabilidad de Rotura (P), el cual se asumía como constante a lo largo de todo el proceso de fragmentación. Sin embargo, en este caso el parámetro P varía en función de una distribución fractal, por lo que no será un *input* (valor de entrada), sino que el modelo irá estimando su valor en cada *step* (etapa).

Por lo tanto, como ya se vio en el apartado 5.4 en la explicación del modelo escala variante, entra en juego un parámetro r que define la dependencia a la escala, en base a la resistencia de los bloques de roca en cada orden de magnitud.

Este modelo se asume de una complejidad superior a los modelos invariantes a la escala, por lo que se utiliza el software Matlab para su análisis y calibración. Los valores de entrada son los mismos, la distribución de volúmenes de bloques obtenida para la caracterización de la IBSD y la medida para la RBSD.

Los valores de los parámetros que ajustan con precisión el modelo a los datos se recogen en la **tabla 4**. El error cuadrático dado en dicho modelo desciende a 0,0929, el cual es mucho menor que cualquier modelo presentado hasta ahora en el presente documento.

Tabla 4 Parámetros que ajustan el modelo variante a la escala en el software Matlab.

Parámetros del Modelo		
Factor de Escala	b	1,823
	r	0,00001
Índice de Supervivencia	Sr	0,681

Además, la estimación de los volúmenes de los bloques fragmentados, tanto como su distribución, se ajustan para casi la totalidad del desprendimiento. En la figura 5.25 se analiza la distribución de volúmenes de bloques acumulados, observándose que el modelo simula con precisión el proceso de fragmentación.

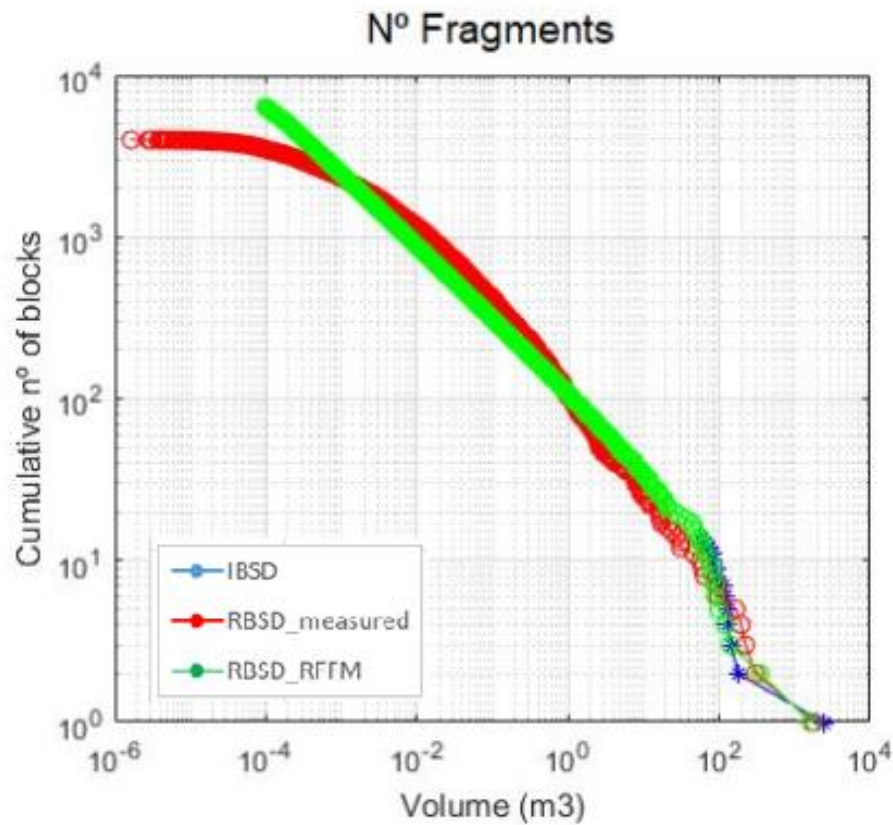


Figura 5.25. Gráfica de la distribución de volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo variante a la escala en Matlab. ($r=0,00001$, $b=1,823$, $Sr=0,681$)

El único inconveniente y el menor ajuste de esta calibración se da para los bloques más pequeños, del orden de 10^{-4}m^3 . Esta falta de ajuste se da en base al fenómeno del *rollover*, explicado anteriormente en la presente tesina, al darse una falta de medidas para los volúmenes más pequeños debido a la resolución de los modelos 3D y de las ortofotos utilizadas (de 2cm). Por lo tanto, esta falta de ajuste se debe a errores en los datos, no en la simulación del modelo, ya que en los resultados del mismo se sigue la linealidad en la distribución logarítmica, lo que es una característica principal de las distribuciones fractales.

En la figura 5.26 también se observa que el modelo también ajusta con precisión en el análisis de frecuencias relativas de volúmenes de bloques de roca, caso que no ocurría en modelos de escala invariante.

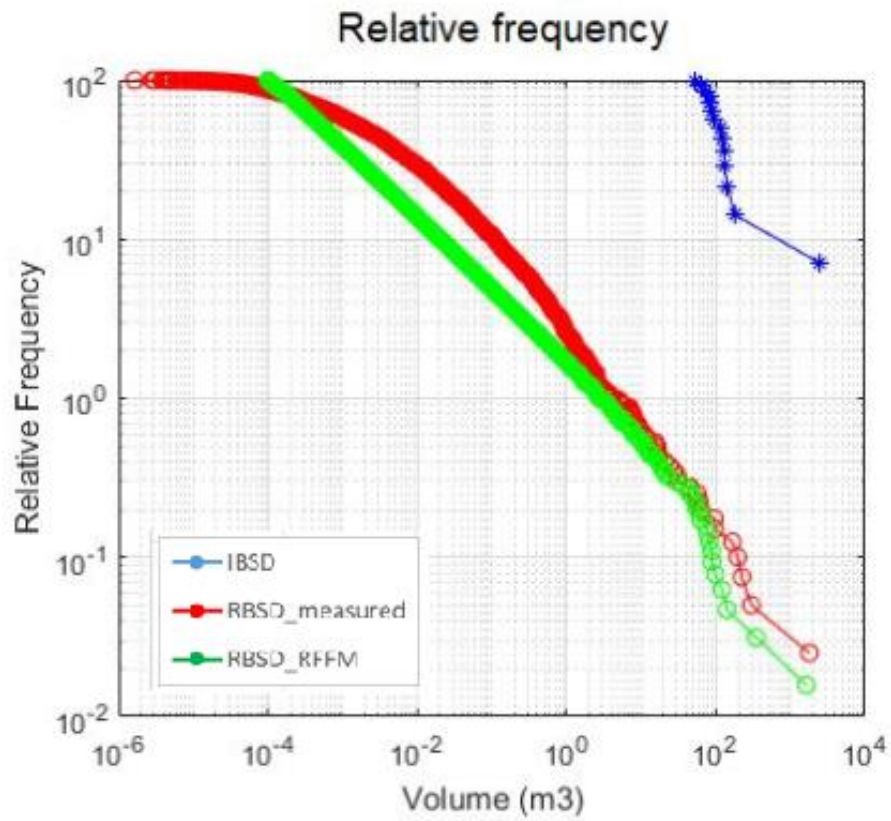


Figura 5.26. Gráfica de frecuencia relativa de los volúmenes de bloques del modelo de fragmentación. Modelo en Matlab variante a la escala. ($r=0,00001$, $b=1,823$, $Sr=0,681$)

6. Comparativa con casos estudiados en RockModels

Con el fin de analizar la validez de los resultados ofrecidos por el modelo de fragmentación utilizado, como ya se ha mencionado, se realiza una comparativa de resultados del desprendimiento de Isona con otros casos analizados dentro del marco del proyecto RockModels. Además, tanto este caso analizado en la presente tesina como los demás que se mostrarán a continuación pretende servir como un aumento del conocimiento respecto a procesos de fragmentación para futuros estudios.

Como ya se ha observado en este proyecto, la característica más relevante y visual es la distribución de volúmenes de fragmentos de roca que se generan durante el desprendimiento. En la figura 6.1 se muestran todas las distribuciones de volúmenes de bloque en el depósito de los desprendimientos analizados. Como se ve en gráficas posteriores, la magnitud del desprendimiento de Isona, en comparación con los demás, es importante, ya que el volumen total del desprendimiento se encuentra dentro de los más grandes, cumpliendo además la ley potencial pertinente. Se incluye también el efecto del “rollover” en todos los casos debido a la falta de muestreo en los volúmenes más pequeños (como se ha explicado anteriormente).

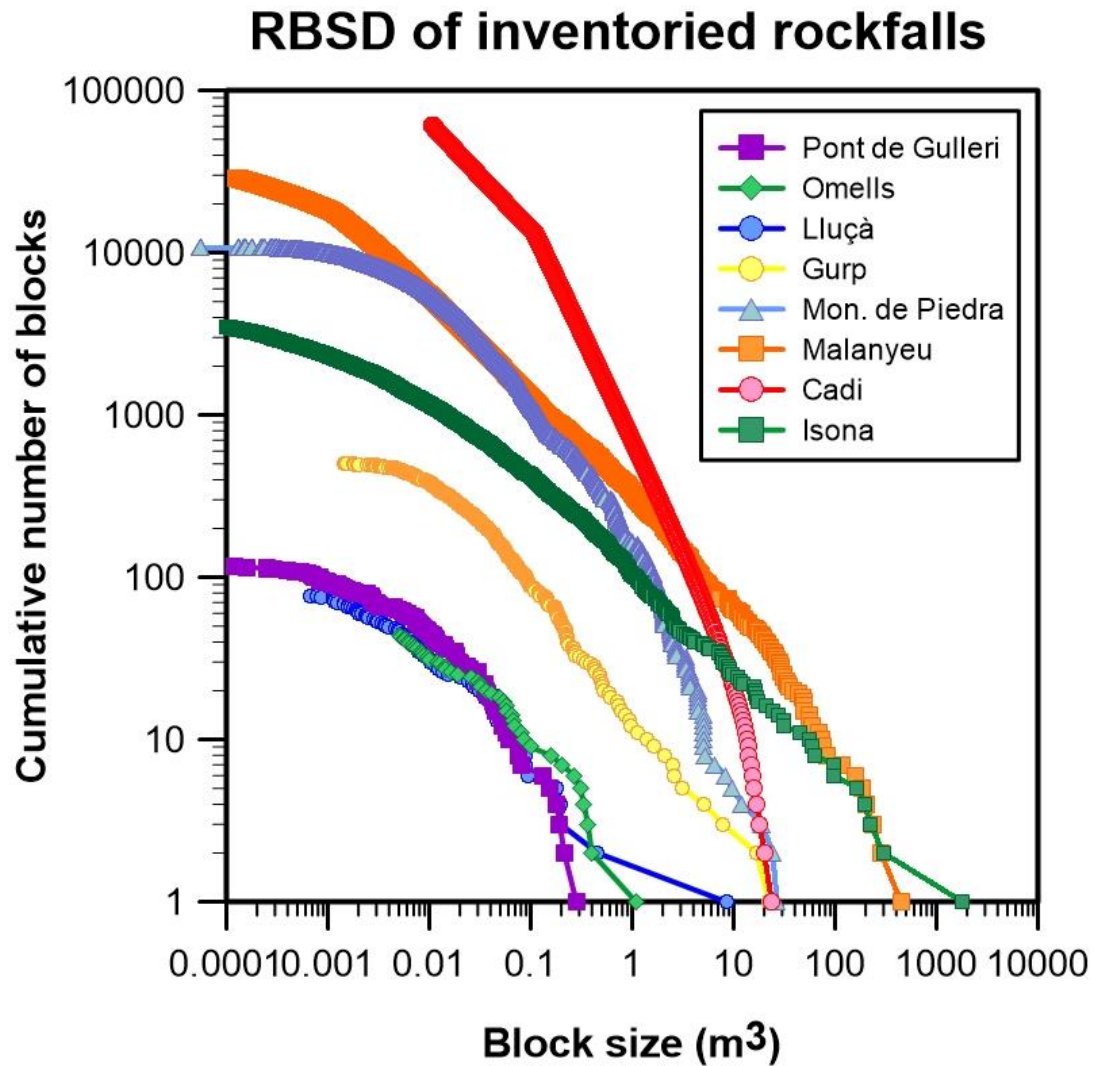


Figura 6.1. Distribuciones de volúmenes de bloques de roca medidos en los desprendimientos Pont de Gulleri, Lluçà etc en el marco del Proyecto RockModels, incluyendo el caso de Isona.

El número total de fragmentos también es considerable, ya que supera en varios órdenes de magnitud los desprendimientos más pequeños.

También es de interés analizar el área de la cicatriz del desprendimiento, ya que, en gran parte, el volumen total del desprendimiento está altamente influenciado por esta superficie, por concepto. Esto se muestra en la figura 6.2, viéndose que, como ocurría anteriormente, el desprendimiento de Isona se encuentra entre los más grandes. Además, en este gráfico, se observa como los resultados se aproximan a la línea de tendencia que marcan los demás desprendimiento del marco de proyectos de RockModels.

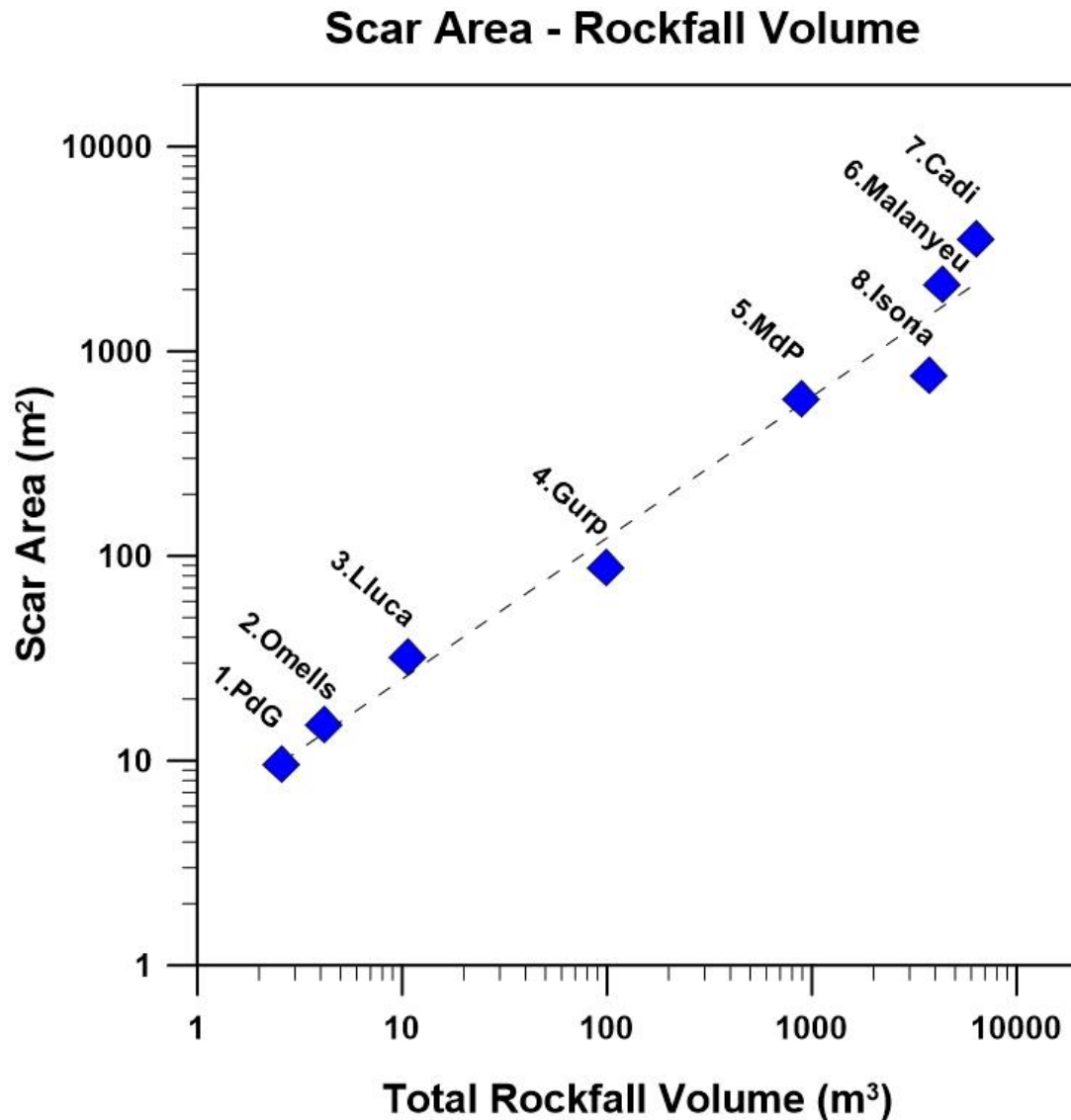


Figura 6.2. Gráfico de la superficie de la cicatriz en función del volumen total de desprendimiento de los casos de RockModels, incluido Isona.

En base al análisis del modelo de fragmentación, se muestran en la figura 6.3 y figura 6.4 los diferentes parámetros de interés que definen el propio modelo. En la figura 6.3, se grafica el número total fragmentos generados en el desprendimiento, comparando los bloques de roca iniciales (IBSD), en el depósito (RBSD) y los simulados con el modelo (RFFM). Se observa como el aumento del número de bloques de la IBSD al RBSD es considerable en todos los casos estudiados, esto es un indicador de la gran magnitud e importancia de todos estos desprendimientos. En el caso concreto de Isona, se observa como el número total de fragmentos es ligeramente mayor en el modelo que en los medidos en el RBSD. Este factor, como ya se ha mencionado anteriormente en este documento en varias ocasiones, se debe a la falta de medida de los bloques más

pequeños debido a la restricción de la resolución de las ortofotos (2cm) y la gran cantidad de bloques por debajo de esa magnitud. Como medida correctora, se podría plantear la mejora de realizar una medida en campo del depósito del desprendimiento, para poder así calibrar los datos obtenidos mediante fotogrametría y obtener mejor información. Este punto podría ser de gran interés para futuros estudios, aunque sería muy costoso en desprendimientos con tal cantidad total de bloques.

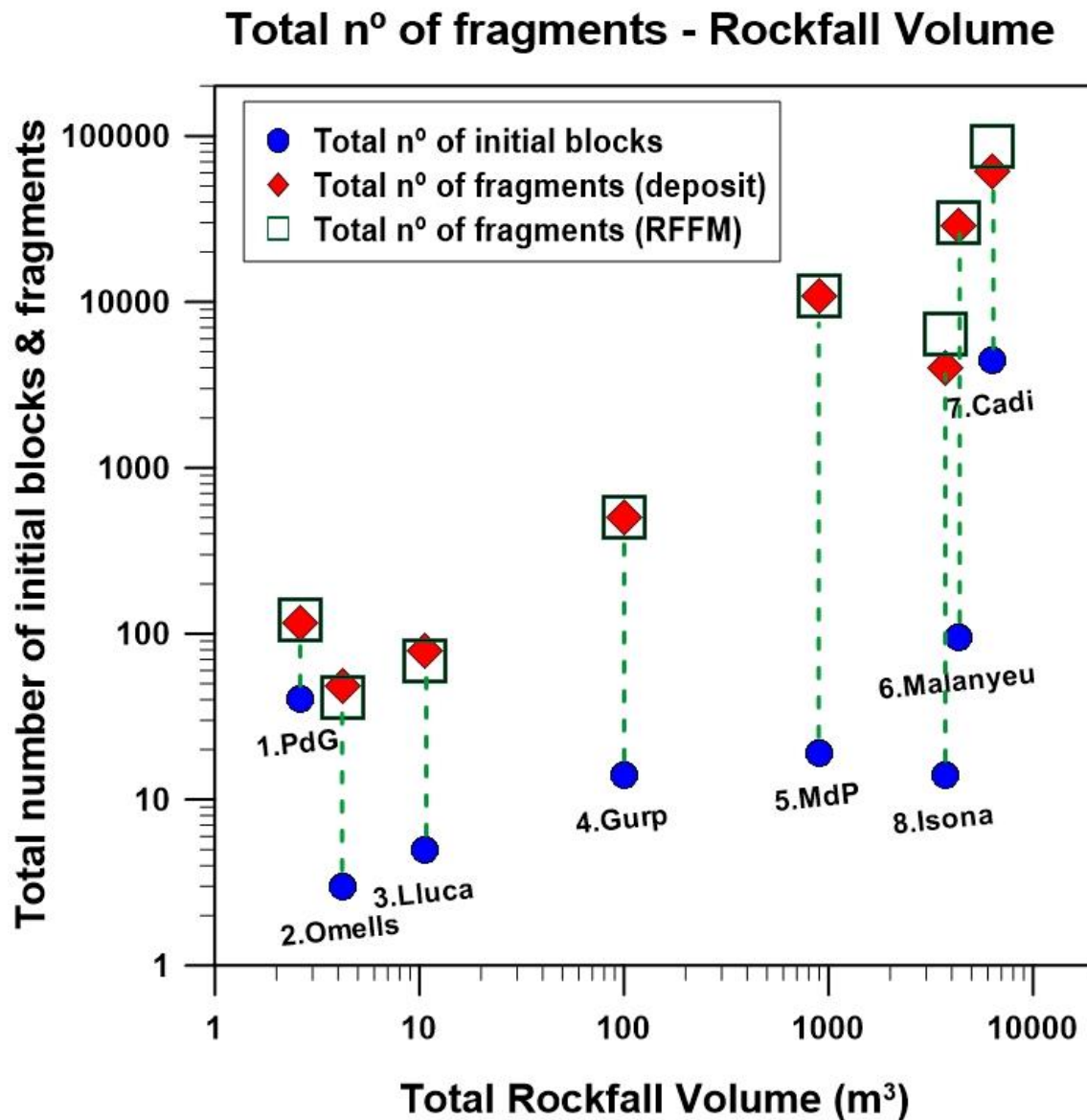


Figura 6.3. Gráfica del número total de bloques e IBSD, RBSD y RFFM en función del volumen total del desprendimiento para los casos de RockModels, incluido Isona.

En lo que a parámetros del modelo puros se refiere, se analizan el ratio de supervivencia de los bloques y el factor de escala para todos los desprendimientos en la figura 6.4. Se puede observar como el caso de Isona alberga resultados muy similares a los demás, aproximándose a un factor de escala (b) de 2 y un ratio de supervivencia de 65-70%.

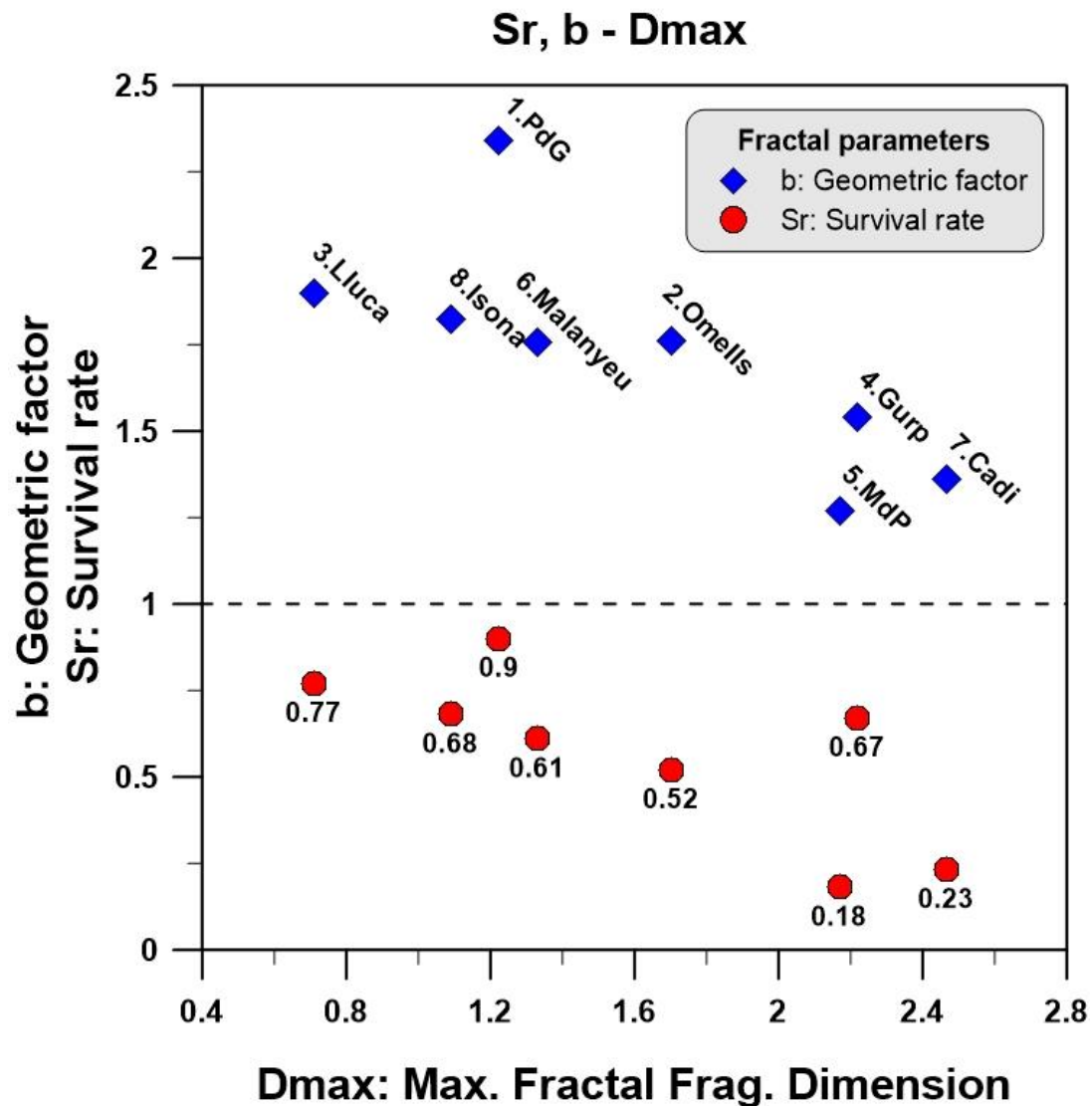


Figura 6.4. Gráfica de los parámetros de los modelos (b y Sr) en función de la dimensión fractal de los casos de RockModels, incluido Isona.

Otro valor de interés es la superficie nueva creada en el desprendimiento, es decir, al fragmentarse un bloque de roca, se genera una o varias superficies en el bloque, en base al impacto con el terreno. Ruiz-Carulla et al (2017) asocian esa nueva superficie con la energía disipada en el proceso. En la figura 6.5 se grafica esa superficie generada en función del volumen total del desprendimiento. En este caso, también en Isona se sigue la línea de tendencia que marcan los demás casos.

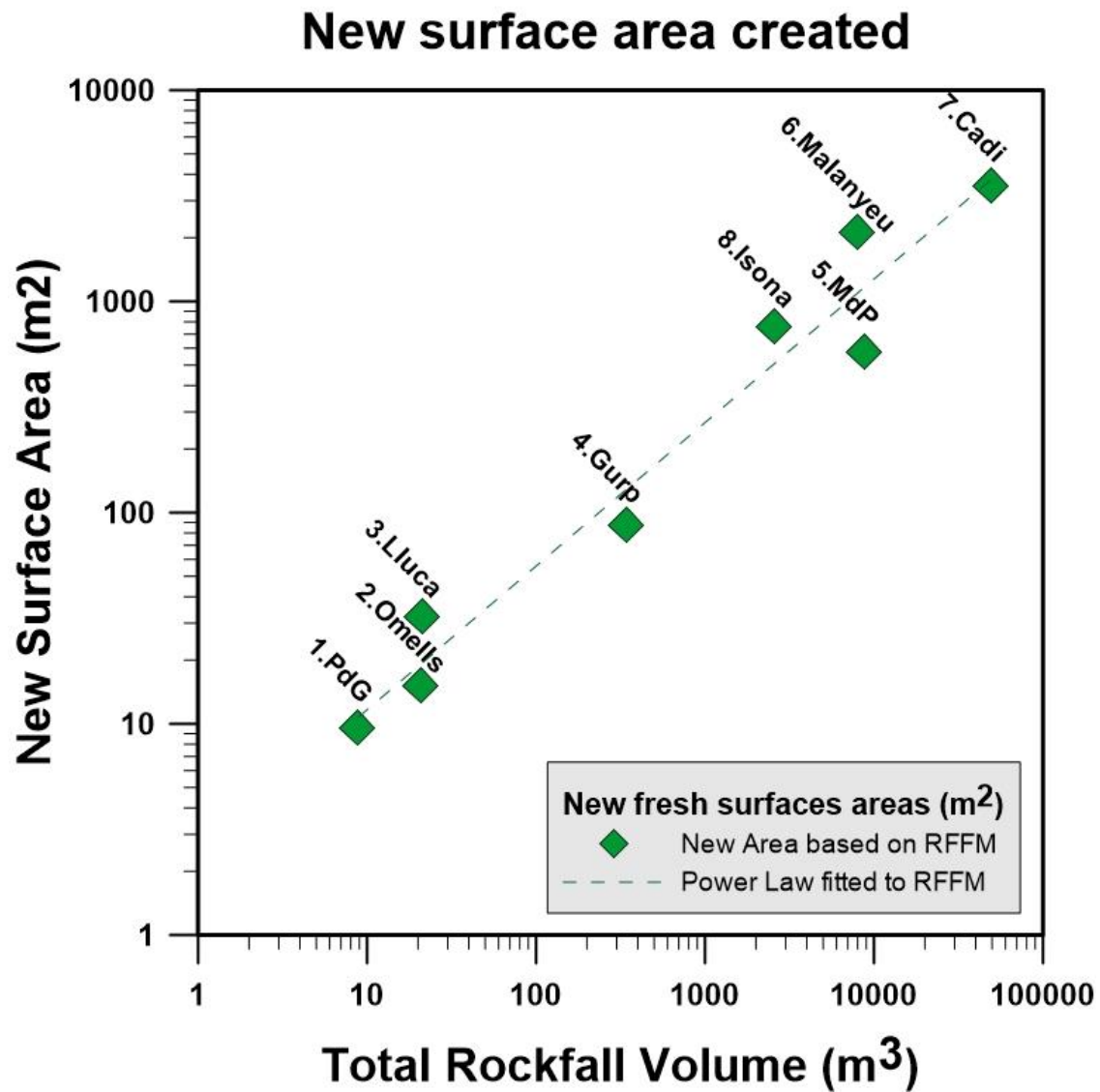


Figura 6.5. Gráfica de la superficie nueva generada en función del volumen total del desprendimiento de los casos de RockModels, incluido Isona.

Adimensionalizando la superficie nueva generada, relacionándola con el volumen total del desprendimiento, es de interés compararla con los parámetros propios del modelo. En la figura 6.6 se observa como también en este análisis, el caso de Isona sigue la tendencia general de los demás casos.

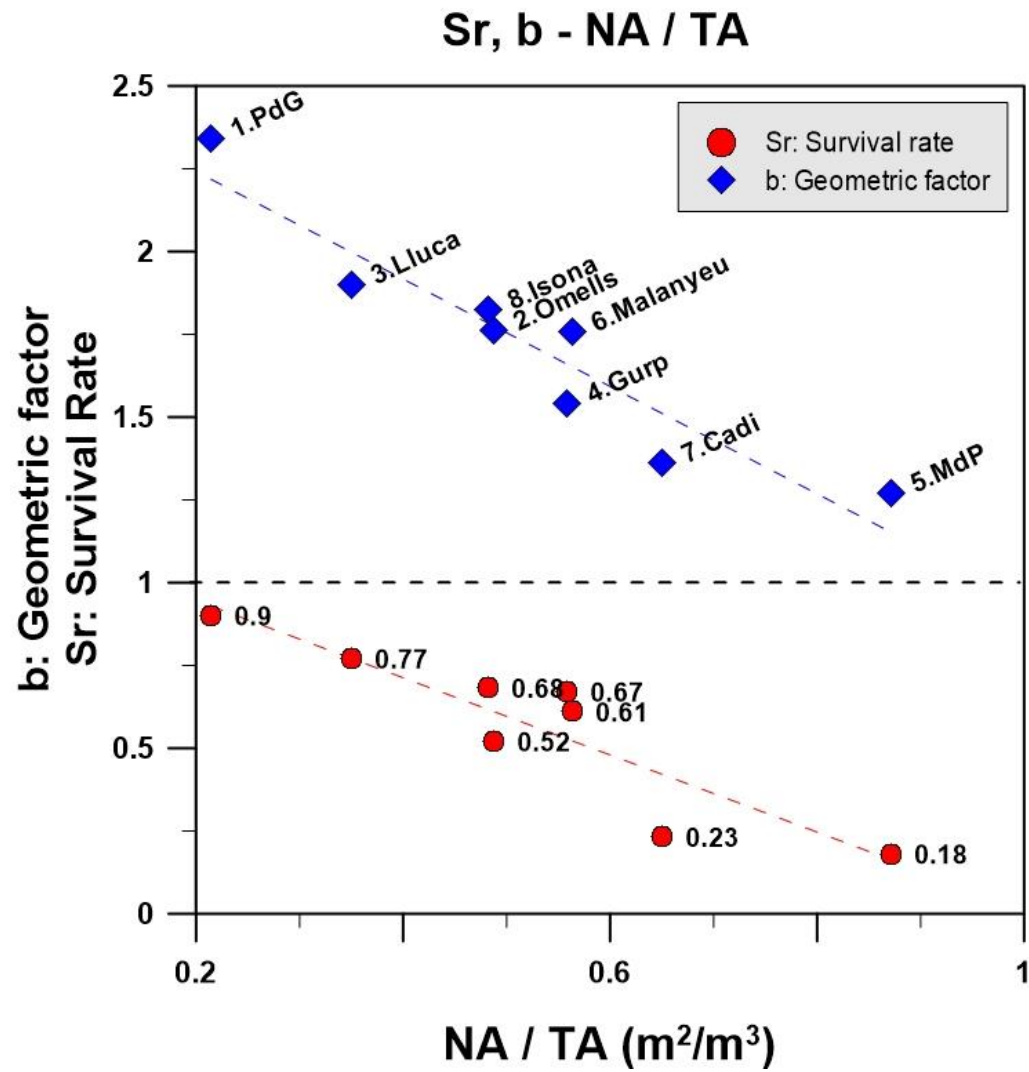


Figura 6.6. Grafica de los valores de los parámetros del modelo en funciones de la superficie nueva generada (adimensionalizada) de los casos de RockModels, incluido Isona.

7. Conclusiones

En el presente trabajo de final de Máster se ha estudiado el fenómeno de fragmentación en un caso real dado en la localidad de Isona. El objetivo principal de la tesina era la obtención de la distribución de bloques inicial (In Situ Block Size Distribution, IBSD), con la que se estimaba el volumen inicial del desprendimiento, la distribución de bloques en el depósito del desprendimiento (Rockfall Rock Size Distribution, RBSD) y la calibración de un modelo que simulara el proceso de fragmentación (Rockfall Fragmentation Model, RFFM).

Se ha realizado una reconstrucción del volumen desprendido gracias a un modelo 3D obtenido mediante vuelos de dron. Analizando el patrón de discontinuidades y juntas en la cicatriz del desprendimiento, se ha estimado la IBSD y el volumen inicial del desprendimiento (3.730m^3). Este método alberga incertidumbres en la estimación de la IBSD, ya que se asume que ocurre disgregación en la totalidad de las discontinuidades presentes en el macizo, sin tener en cuenta cohesión ni otras resistencias que resulten en un menor número de bloques iniciales.

Mediante fotogrametría aérea (vuelos de dron) se ha obtenido una ortofoto de la zona de estudio de 2 centímetros de resolución, lo que mejora la caracterización del depósito. La ortofoto ofrecida por el Instituto Cartográfico de Cataluña tiene una resolución de 25 centímetros, lo que no permite el análisis de los bloques más pequeños. Como resultado, se han medido las áreas de 3.988 bloques existentes en el depósito. Aplicando una transformación de áreas a volúmenes y realizando correcciones en los bloques más grandes se ha ajustado el volumen total del desprendimiento y de todos los fragmentos generados, obteniendo la RBSD. Como mejora en la metodología adoptada, sería conveniente realizar una medida manual de los fragmentos en campo con el fin de calibrar las medidas realizadas.

Se ha utilizado un modelo de fragmentación de 3 parámetros propuesto por Ruiz-Carulla et al (2017). Se realizaba una división por compartimentos de los volúmenes de fragmentos de roca con el fin de simplificar el modelo. Los resultados obtenidos no simulaban con precisión el proceso de fragmentación, ya que no se daba la conservación

de masa porque se utilizaba una media aritmética del volumen de bloque por cada clase. Por lo tanto, se ha utilizado finalmente un análisis individual de cada fragmento de bloque.

Inicialmente, se suponía el proceso como invariante a la escala, como proponían autores como Turcotte et al (1986). Sin embargo, los resultados obtenidos tampoco ajustaban las medidas obtenidas de la RBSD.

Finalmente, se ha utilizado un modelo variante a la escala adaptando los conceptos propuestos por Perfect (1997), que proponía una probabilidad de rotura que variaba para cada orden de magnitud. Este modelo simulaba con precisión (error cuadrático de 0,09) el proceso de fragmentación del desprendimiento de Isona. Los parámetros que definían el modelo eran un factor de escala (b) de 1,823, índice de supervivencia (S_r) de 0,681 y el parámetro que definía la variación a la escala (r) de 0,00001.

Por último, se ha realizado la comparación con los casos del inventario del marco de proyectos RockModels. Los resultados de Isona concuerdan con los obtenidos en los demás casos inventariados. En gráficas en las que se valoran resultados como parámetros del modelo, distribución de volúmenes o nueva superficie generada el modelo del desprendimiento de Isona sigue la tendencia general de los demás casos, por lo que estos datos podrán ser utilizados en futuros estudios del marco de RockModels.

8. Líneas de investigación futuras

En el ámbito de los desprendimientos rocosos y su proceso de fragmentación existen todavía muchos interrogantes, ya que las herramientas que permiten su mayor conocimiento son relativamente modernas. Además, en un desprendimiento rocoso entran muchos factores en cuenta: el material desprendido, la energía potencial de los bloques e incluso el ángulo de impacto de los bloques con el terreno.

Como propuesta de desarrollo de los modelos de fragmentación, es necesario incluir más casos reales en los inventarios utilizados en la presente tesina, con el fin de aumentar el conocimiento en este tema. Además, se pueden calibrar ensayos controlados en cantera, en los que se arrojen diferentes tamaños de bloques de roca y se modelen estos con diferentes sensores colocados a lo largo de la ladera.

Por último, es de interés proponer que se desarrollen modelos que implementen el modelo de fragmentación en simuladores de trayectorias de bloques (figura 8.1). Esto permite no solo conocer el proceso de fragmentación, sino también la propagación de los bloques a lo largo de todo el depósito.

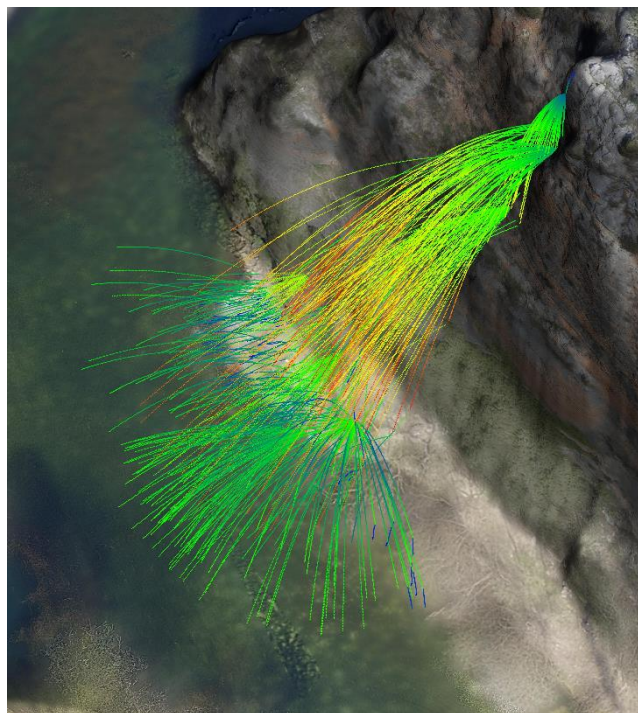


Figura 8.1. Análisis de trayectorias en desprendimientos rocosos.

Propuesta de mejoras en la metodología adoptada en esta tesina.

Como ya se ha comentado, principalmente existen dos focos de mejora en la metodología utilizada en el presente proyecto.

- 1- La caracterización de la IBSD y de los bloques de roca que se disgregan antes de impactar con el terreno se realiza en función de todas las discontinuidades y juntas existentes, sin tener en cuenta la posibilidad de que exista cohesión en ellas, y no haya disgregación en la totalidad de planos. Para ello, habría que hacer especial hincapié en las energías y fuerzas tras los impactos y las resistencias propias de las discontinuidades del macizo rocoso, aunque no se augura como una tarea sencilla.

Es de interés el uso de métodos de modelos de elementos discretos que permitan conocer y simular el comportamiento de las juntas y discontinuidades (Wang Y. et al., 2010), analizando su resistencia frente a los impactos con el terreno. Sin embargo, estos métodos necesitan una gran cantidad de parámetros, haciendo muy complejo este análisis.

- 2- La caracterización del depósito (RBSD) y la medida de todos los volúmenes de bloques de roca fragmentados se ha realizado mediante fotogrametría aérea, la resolución del modelo 3D y de las ortofotos obtenidas (2cm), por lo que no se miden los fragmentos más pequeños. Con el fin de plantear una mejora en este aspecto, se pueden realizar medidas en campo que calibren los resultados obtenidos por este método, y comprobar la validez de los mismos. Cabe destacar que la fotogrametría aérea es un método muy seguro a la hora de obtener datos en campo, ya que facilita el acceso a zonas inestables y evita los riesgos de tomar medidas en campo en zonas que pueden llegar a ser inestables, anteponiendo la seguridad.

También, con el objetivo de plantear una mejora y contrastar los datos obtenidos se puede utilizar la segmentación automática como método complementario. La segmentación automática en 2D se trata de realizar un análisis raster que delimite de forma automática las áreas de los fragmentos de roca. Este método puede también aplicarse a la nube de puntos 3D, definiendo los volúmenes de los fragmentos automáticamente.

9. Referencias bibliográficas

Agliardi, F., & Crosta, G. B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), 455–471. doi:10.1016/S1365-1609(03)00021-2

Bowman ET, Andrew Take W (2014) The runout of chalk cliff collapses in England and France—case studies and physical model experiments. *Landslides* 12(2):225–239. doi:10.1007/s10346-014-0472-2

Brideau M, Sturzenegger M, Stead D, Jaboyedoff M, Lawrence M, Roberts N, Ward B, Millard T, Clague J (2012) Stability analysis of the 2007 Chehalis Lake landslide based on long-range terrestrial photogrammetry and airborne LiDAR data. *Landslides* 9:75–91. doi:10.1007/s10346-011-0286-4

Charrière M, Humair F, Froese C, Jaboyedoff M, Pedrazzini A, Longchamp C (2015) From the source area to the deposit: collapse, fragmentation, and propagation of the Frank Slide. *Geol Soc Am Bull.* doi:10.1130/B31243.1

Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2009). Power-Law Distributions in Empirical Data. *SIAM Review*, 51(4), 661–703. doi:10.1137/070710111

Corominas J, Mavrouli O, Santana D, Moya J (2012) Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. A: International Symposium on Landslides. B Landslides and engineered slopes^, vol 2013. CRC Press. Taylor & Francis Group, Banff, pp. 1159–1164

Crosta, G. B. & Agliardi, F. (2003). A methodology for physically-based rockfall hazard assessment, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 407–422

Crosta GB, Agliardi F, Frattini P, Lari S, Lollino G (2015) Key issues in rock fall modeling, hazard and risk assessment for rockfall protection. *Engineering Geology for Society and Territory* 2:43–58. doi:10.1007/978-3-319-09057-3_4

Cunningham CVB (1983) The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. In: Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 22–26 August, Lulea, Sweden, pp 439–454

Cunningham CVB (1987) Fragmentation estimations and Kuz-Ram model—four years on. Proceedings of second International Symposium on rock fragmentation by blasting, Keystone, Colorado, p 475–87

Dussauge, C., Grasso, J.-R., & Helmstetter, A. (2003). Statistical Analysis of Rock Fall Volume Distributions: Implications for Rock Fall Dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 108 B6, 2286.

Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, a., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., & Giraud, a. (2002). Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2(1/2), 15–26. doi:10.5194/nhess-2-15-2002

Elmoultie, M. K., & Poropat, G. V. (2011). A Method to Estimate In Situ Block Size Distribution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(3), 401–407. doi:10.1007/s00603-011-0175-0

Firpo, G., Salvini, R., Francioni, M., & Ranjith, P. G. (2011). Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(7), 1045– 1054. doi:10.1016/j.ijrmms.2011.07.007

Gili JA, Ruiz-Carulla R, Matas G, Corominas J, Lantada N, Núñez MA, Mavrouli O, Buill F, Moya J, Prades A, Moreno S (2016) Experimental study on rockfall fragmentation: in situ test design and firsts results. International Symposium Landslides 2016 (ISL2016), pp 983–990, Napoli (Italia)

Haneberg WC, Norrish NI, Findley DP (2006) Digital outcrop characterization for 3-d structural mapping and rock slope design along Interstate 90 near Snoqualmie Pass, Washington. Proceedings 57th Annual Highway Geology Symposium, 1–14

Haug ØT, Rosenau M, Leever K, Oncken O (2016) On the energy budgets of fragmenting rockfalls and rockslides: insights from experiments. *J Geophys Res Earth Surface* 121:1310–1327. doi:10.1002/2014JF003406

Jaboyedoff M, Dudt JP, Labiouse V (2005) An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 5:621–632

Jaboyedoff M, Metzger R, Oppikofer T, Couture R, Derron MH, Locat J, Turmel D (2007) New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D–imaging cloud points: COLTOP-3D software. In: Eberhardt E, Stead D, Morrison (eds) *Rock mechanics: meeting society's challenges and demands*, Proceedings of the 1st Canada–U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27–31 May. Taylor & Francis, London, 1, 61–68

Kim, B. H., Cai, M., Kaiser, P. K., & Yang, H. S. (2006). Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-persistent Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(2), 169– 192. doi:10.1007/s00603-006-0093-8

Latham J, Ping L (1999) Development of an assessment system for the blastability of rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci* 36:41–55

Lato M, Kemeny J, Harrap RM, Bevan G (2012) Rock bench establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using LIDAR and photogrammetry. *Comput Geosci* 50:106–114

Locat P, Couture R, Leroueil S, Locat S (2006) Fragmentation energy in rock avalanches. *Can Geotech J* 851(20060135):830–851. doi:10.1139/T06-045

Mandelbrot B (1982) *La geometría fractal de la naturaleza*. Tusquets, ISBN 8483105497, 9788483105498

Okura Y, Kitahara H, Sammori T, Kawanami A (2000) The effects of rockfall volume on runout distance. *Eng Geol* 58(2):109–124

Perfect, E. (1997). Fractals models for the fragmentation of rocks and soils: a review. *Engineering Geology*, 48, 185–198.

Ruiz-Carulla R, Corominas J, Mavrouli O (2015) A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits. *Landslides* 12(4):815–825. doi:[10.1007/s10346-015-0600-7](https://doi.org/10.1007/s10346-015-0600-7)

Ruiz-Carulla R, Corominas J, Mavrouli O (2016) Comparison of block size distribution in rockfalls. *International Symposium on Landslides 2016 (ISL2016)*, pp 1767–1774, Napoli (Italia)

Ruiz-Carulla R, Corominas J & Mavrouli O (2017). A fractal fragmentation model for rockfalls. *Landslides* 14 (3): 875-879. Doi: [10.1007/s10346-016-0773-8](https://doi.org/10.1007/s10346-016-0773-8)

Salvini, R., Francioni M., Riccucci S., F. Bonciani, I. C. (2013). Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola Iselle railway, the Italian Alps. *Geomorphology* 185 (2013) 110-122.

Sturzenegger M., Stead D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106, 163–182.

Tavallali, A., & Vervoort, A. (2010). Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(2), 313–322. doi:[10.1016/j.ijrmms.2010.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.01.001)

Turcotte, D. L. (1990). Implications of chaos, scale-invariance, and fractal statistics in geology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(3), 301–308. doi:[10.1016/0031-0182\(90\)90071-E](https://doi.org/10.1016/0031-0182(90)90071-E)

Turcotte, D. L. (2007). Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models. *Geomorphology*, 91(3-4), 302–310. doi:[10.1016/j.geomorph.2007.04.016](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.016)

Wang, Y., & Tonon, F., (2010). Discrete Element Modeling of Rock Fragmentation upon Impact in Rock Fall Analysis. *Rock Mech Rock Eng* 44:23–35.

Páginas webs

Página web del Instituto Cartográfico de Cataluña: <http://www.icc.cat/> Consultada por última vez el día 7 de Mayo de 2018.